



**Manuel António
Gouveia Matos**

Optimização de redes ópticas em operação

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. António Luís de Jesus Teixeira, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrónica, Telecomunicações e Informática, da Universidade de Aveiro e do Dr. Paulo Sérgio de Brito André, Professor Auxiliar no Departamento de Física, da Universidade de Aveiro e Investigador Auxiliar no Instituto de Telecomunicações.

O júri

Presidente

Prof. Dr. José Rodrigues Ferreira da Rocha
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Hypolito José Kalinowski
Professor Associado da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. António Luís Jesus Teixeira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Dr. Paulo Sérgio de Brito André
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Começo por endereçar os meus agradecimentos ao Professor Dr. António Luís de Jesus Teixeira, por se ter disponibilizado a ser o tutor do actual trabalho e pelas inúmeras contribuições ao conteúdo da dissertação. Da mesma forma manifesto o meu agradecimento ao Professor Dr. Paulo Sérgio de Brito André co-tutor do actual trabalho pela ajuda na organização e realização da parte prática da dissertação e igualmente na estruturação do texto da dissertação.

Um agradecimento muito especial à minha família e amigos pelo incentivo e encorajamento constante.

Agradeço também de uma forma muito especial, aos meus amigos Eng. João Oliveira, Eng. Pedro Matos e Dr. Modesto Morais pelas contribuições e disponibilidade manifestada. Um agradecimento também ao meu colega Eng. Sérgio Castro pelas inúmeras conversas e discussões sobre temas tecnológicos, especialmente centradas no âmago da dissertação. Um grande abraço de reconhecimento ao meu amigo e colega Luiz Farias por todo o apoio e incentivo que disponibilizou ao longo desta caminhada.

Um abraço ainda ao meu amigo Eng. Carlos Gonçalves e a sua equipa por toda a colaboração, especialmente ao nível do apoio logístico na prossecução da parte prática da dissertação.

Um profundo reconhecimento a REN Gasodutos, empresa onde sou colaborador, nas pessoas dos Engs. Rui Marmota, Mouro Vaz e Rui Cardoso, por ter apostado em mim, tendo-me propiciado condições, nomeadamente económicas, subsidiando o Mestrado.

Ao Instituto de Telecomunicações, o meu agradecimento, pela disponibilização dos meios para a realização das medições de campo, as quais permitiram enriquecer o conteúdo da dissertação.

Por fim um agradecimento a todos aqueles que de uma forma directa ou indirecta contribuíram para que esta aventura tivesse tido um final de acordo com as expectativas.

Palavras-chave

Optimização de redes ópticas em operação, modelos de simulação, mistura de quatro ondas, dispersão dos modos de polarização, dispersão cromática.

Resumo

O crescente número de serviços de telecomunicações que as redes ópticas actualmente suportam, fazem com que alguns passos que foram tomados anteriormente, e que, no contexto em que foram implementados, eram soluções muito interessantes, como fibras de dispersão deslocada e que representaram grandes investimentos para certos operadores, estão hoje em dia limitados pela presença de múltiplas outras alternativas que foram desenvolvidas para outros tipos de tecnologias que se adoptaram como padrão.

Este facto faz com que seja necessário estudar alternativas de evolução e caminhos seguros para essa evolução de forma a permitir que estes investimentos sejam rentabilizados de uma forma clara e interessante para o operador e para o utilizador.

Nesta perspectiva, o que se pretende neste trabalho é um estudo aprofundado de um caso específico de uma rede óptica baseada em fibras de dispersão deslocada, e prever os principais limites desta para a sua evolução para os panoramas actuais em que os débitos nas redes de transporte são necessariamente elevados, ou alternativamente, baseados em sistemas de comunicação de multi comprimentos de onda.

Keywords

Optimization of optical networks in operation, simulation models, four-wave mixing, polarization mode dispersion, chromatic dispersion.

Abstract

The increasing number of telecommunication's services actually supported by the optical networks, make with, previously implemented technical solutions, as dispersion-shifted fibers, which represented at the time great investments for certain operators, to be limited by other alternatives that had been developed and adopted as standard.

This fact requires the necessity to study alternative and safe processes for this evolution, allowing that these investments are optimize in a clear and interesting form for the operator and the user.

In this perspective, what it is intended in this work is a deepened study of a specific case, related with a private network dispersion-shifted fiber based, and to foresee the main limitation of the network evolution for the nowadays scenarios, where the backbone networks debits necessarily are raised, or alternatively based, in multi-wavelengths communication system's.

*À Lena, ao Miguel e à Marta,
uma dedicatória muito especial,*

*“São a minha fonte de inspiração,
sem eles, a vida não tinha o mesmo sabor”*

Índice

CAPÍTULO 1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Estrutura da dissertação	1
1.2	Enquadramento e motivação.....	2
1.3	Principais contribuições	3
CAPÍTULO 2	CARACTERÍSTICAS DA PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS.....	5
2.1	Propagação do sinal nas Fibras Ópticas.....	5
2.2	Factores que limitam a transmissão nas fibras ópticas nomomodo	8
2.2.1	Efeitos lineares nas fibras ópticas.....	9
2.2.2	Efeitos não lineares em fibras ópticas monomodo.....	16
2.2.2.1	Dispersão estimulada da luz.....	17
2.2.2.2	Modulação não linear de fase	18
2.2.2.3	Diafonia intercanal	20
2.2.2.4	Mistura de Quatro Ondas (FWM).....	22
2.3	Conclusões	27
2.4	Referências.....	27
CAPÍTULO 3	ELEMENTOS DAS REDES ÓPTICAS	31
3.1	Interfaces físicas do sistema SDH.....	31
3.2	Amplificação óptica.....	36
3.3	Elementos passivos das redes WDM.....	41
3.3.1	Acopladores ópticos.....	42
3.3.2	Multiplexadores WDM	44
3.4	Conclusões	49
3.5	Referências	49
CAPÍTULO 4	TÉCNICAS DE MEDIDA: TESTE E VALIDAÇÃO.....	53
4.1	Determinação do valor da atenuação espectral em fibras cabladas.....	53
4.1.1	Medição da atenuação espectral pelo método de retro espalhamento (ou reflectometria óptica).....	54
4.1.2	Medição da atenuação em comprimentos de onda discretos pelo método das perdas de inserção	57
4.2	Técnica do desvio de fase: Uma solução para medição do coeficiente de dispersão cromática	59
4.3	Técnica interferométrica: Uma solução para medição da PMD.....	64
4.3.1	Técnica interferométrica.....	66

4.3.2	Determinação do atraso da PMD pela leitura de um Interferograma	68
4.4	Medição das perdas ópticas de retorno	71
4.5	Referências	75
CAPÍTULO 5	CARACTERIZAÇÃO DE UMA REDE ÓPTICA EM OPERAÇÃO.....	77
5.1	Avaliação das perdas de inserção e de retorno, reflectâncias discretas e reflectometria óptica	78
5.2	Avaliação da dispersão cromática.....	84
5.3	Avaliação da PMD.....	86
5.4	Avaliação do efeito FWM.....	89
5.5	Conclusões	99
5.6	Referências	100
CAPÍTULO 6	OPTIMIZAÇÃO DE UMA REDE ÓPTICA EM OPERAÇÃO	103
6.1	Optimização da rede óptica: Perspectiva monocanal	104
6.2	Optimização da rede óptica: Perspectiva multicanal	115
6.3	Optimização da rede óptica: Uma perspectiva diferente.....	122
6.4	Aspectos mais importantes do estudo dos cenários de optimização.....	124
6.5	Conclusões	125
6.6	Referências	126
CAPÍTULO 7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	129
7.1	Considerações finais	129
7.2	Desenvolvimentos futuros	130
ANEXO A	RECOMENDAÇÕES MAIS IMPORTANTES PARA FIBRAS ÓPTICAS CABLADAS..	133
ANEXO B	PRINCIPAIS METODOLOGIAS USADAS NA MEDIÇÃO DAS REDES ÓPTICAS.....	134
ANEXO C	RECOMENDAÇÕES MAIS IMPORTANTES PARA REDES ÓPTICAS ÓPTICAS.....	136
LISTA DE FIGURAS	139
LISTA DE TABELAS	144

Capítulo 1

Introdução

1.1 Estrutura da dissertação

Neste primeiro capítulo, apresenta-se o contexto em que a tese se insere, suas motivações principais e enunciam-se as contribuições relevantes no estudo das redes ópticas em operação, na óptica do autor.

Esta tese está dividida em sete capítulos que abordam os diversos aspectos de uma rede óptica em operação e que directa ou indirectamente influenciam o estabelecimento de cenários para a sua optimização, estruturando-se do seguinte modo.

No **capítulo 2** faz-se a modelização da fibra óptica, estudam-se genericamente os fenómenos associados à propagação da luz em meios guiados e apresenta-se a equação de onda. Ainda no mesmo capítulo estudam-se os principais factores limitativos à transmissão de sinais nas fibras ópticas, os efeitos lineares; atenuação, dispersão cromática e os modos de polarização (PMD) e os não lineares, em evidência o efeito da mistura de quatro ondas (FWM). Pela sua relevância, avaliam-se ainda as penalidades devidas à diafonia inter-canal.

No **capítulo 3** apresentam-se as interfaces ópticas do sistema hierárquico digital síncrono (SDH - *Synchronous Digital Hierarchy*) relevantes com a implementação dos cenários de optimização da rede óptica. No mesmo capítulo, estuda-se a amplificação óptica, e descreve-se genericamente o modo de operação e funcionamento dos amplificadores de fibra dopada e semiconductor. Por último, estudam-se os elementos passivos de uma rede óptica com base na multiplexagem no comprimento de onda (WDM - *Wavelength-Division Multiplexing*), em particular; os acopladores e os multiplexadores.

O **capítulo 4** é dedicado ao teste e validação de algumas técnicas de medida dos parâmetros de desempenho das fibras ópticas. Os parâmetros avaliados são: a atenuação espectral em fibras ópticas cabladas, pelas técnicas da reflectometria óptica e das perdas de inserção; o coeficiente de

dispersão cromática pela técnica do desvio de fase; o atraso diferencial de grupo (PMD) pela técnica interferométrica e as perdas ópticas de retorno.

No **capítulo 5** apresentam-se medições realizadas na rede óptica em operação. Essas medições estão organizadas em dois grupos. O primeiro destes tem como principal objectivo modelizar a rede óptica em operação, e incidem na verificação das perdas de inserção e de retorno, reflectâncias discretas e reflectometria óptica, e da dispersão cromática. Com essa intenção, essas medições, são depois confrontadas com as principais recomendações do sector de padronização da União Internacional de Telecomunicações (ITU-T). O segundo grupo engloba a PMD e o efeito da FWM, e têm por base medições de campo realizadas pelo autor, no âmbito desta dissertação.

No **capítulo 6** estudam-se cenários para optimização de redes ópticas em operação. Com essa intenção e com recurso à ferramenta de simulação (VPI TransmissionMaker), os cenários de implementação são estabelecidos tendo por base critérios como os da atenuação, da dispersão e da modulação não linear de fase (SPM) em conformidade com as principais recomendações da ITU-T aplicáveis. Estudam-se ainda soluções para a implementação de tecnologias de transmissão multicanal focando no efeito da FWM.

Por último, no **capítulo 7**, elaboram-se as principais conclusões e apontam-se as perspectivas de desenvolvimento futuro deste trabalho.

1.2 Enquadramento e motivação

Este trabalho enquadra-se na actividade profissional do autor, sendo que, como gestor de recursos da rede, pretende estudar as perspectivas de evolução da rede implementada e as suas principais limitações. A motivação para este trabalho tem assim por base, o estudo das possibilidades de evolução da rede implementada, de forma a poder ser reaproveitada e redesenhada, para acomodar os novos requisitos de transmissão requeridos pelos operadores.

Tendo em vista a concretização desse objectivo, é feita a caracterização das principais limitações das fibras ópticas monomodo de dispersão deslocada, sendo dado especial ênfase à avaliação da FWM e da PMD.

É ainda dada atenção especial aos elementos passivos constituintes das redes ópticas e às principais técnicas usadas para a aferição e validação do desempenho, que genericamente constituem critérios para a aceitação das redes ópticas instaladas.

1.3 Principais contribuições

As principais contribuições deste trabalho, na opinião do autor, são extraíveis nas conclusões do estudo realizado ao longo do capítulo 6, isto é, levando em conta as limitações da rede, pode concluir-se, que a sua adequação à transmissão multicanal, passa por serem usados baixos ritmos de transmissão e um pequeno número de canais, devido ao efeito da FWM. Por outro lado, e quanto à opção monocanal, os cenários estudados mostram que a rede pode suportar ritmos de transmissão até 10 Gb/s, e que para ritmos de transmissão superiores, a PMD em termos das distâncias alcançáveis e a SPM, em termos do limite máximo da potência óptica a injectar na fibra, poderão ser condicionantes importantes na sua implementação.

É igualmente relevante na caracterização da rede óptica em operação, a constatação de serem a dispersão cromática e a PMD relativamente insensíveis a flutuações térmicas ambientais. Esta circunstância deverá ter origem no facto dos cabos de fibras ópticas serem subterrâneos e, estarem instalados a uma profundidade média não inferior a um metro, o que relacionado com a sua proximidade do gasoduto, no qual o gás é transportado a uma temperatura relativamente estável, deverá impedir variações mais bruscas da temperatura.

Por último, e numa lógica de rentabilização técnica/económica da infra-estrutura instalada, considera-se importante, a discussão de algumas técnicas de medição realizada ao longo do capítulo 4, as quais são ferramentas essenciais na avaliação dos parâmetros de desempenho das fibras ópticas instaladas. Pela confrontação dos dados oriundos dessas medições com os dados originais, medidos há altura da instalação da rede, é possível traçar o perfil evolutivo da própria rede.

No âmbito desta dissertação foram publicados os seguintes trabalhos:

“PMD Characterization of installed fiber-optic cables”, apresentado ao III Symposium on Enabling Optical Networks – SEON 2005, Junho de 2005, Instituto de Telecomunicações (IT), Aveiro, Portugal.

“Long-term Four Wave Mixing evaluation in an installed dispersion fiber-optic cable network”, apresentado ao IV Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, Junho de 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal.

“Caracterização da dispersão numa rede óptica em operação”, em fase de publicação, na Revista do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

“FWM efficiency correlation with temperature variation in a dispersion-shifted fiber”, submetido a publicação no Internacional Microwave and Optoelectronics Coference (IMOC), 2007, Salvador, BA, Brasil.

Capítulo 2

Características da propagação em fibras ópticas

Neste capítulo discutem-se alguns aspectos relacionados com a propagação de impulsos na fibra óptica e identificam-se alguns dos principais parâmetros que se relacionam com a propagação da luz em meios guiados.

Na secção 2.1 apresentam-se as características de um guia de ondas. De seguida, faz-se uma abordagem sucinta à propagação de um sinal óptico e apresenta-se a equação não linear de Schrödinger (NLSE- *Non-Linear Schrödinger Equation*), que descreve, considerando algumas aproximações e limitações, a propagação de impulsos ópticos num meio guiado. O objectivo desta parte do trabalho é evidenciar e compreender os parâmetros que limitam a propagação de impulsos em fibras monomodo, tendo em consideração os efeitos lineares e não lineares das fibras ópticas.

Na secção 2.2 analisam-se as propriedades lineares das fibras ópticas: a atenuação, a dispersão e a birrefringência. Considerando o estado actual de evolução das telecomunicações, o efeito da PMD é considerado como um dos mais limitativos factores à transmissão de sinais com elevados ritmos e a grandes distâncias. Ainda, na mesma secção, discutem-se os efeitos do espalhamento estimulado da luz: efeitos de Brillouin e de Raman e, os relacionados com a modulação não linear de fase resultantes do índice de refração não linear: auto modulação de fase e modulação cruzada de fase.

Por último, estuda-se a diafonia intercanal, e de uma forma mais aprofundada o fenómeno da mistura de quatro ondas, devido à sua relevância na implementação de sistemas multicanal em fibras de dispersão deslocada.

2.1 Propagação do sinal nas Fibras Ópticas

Uma forma simples de explicar a propagação da luz nas fibras ópticas, pode ser através da óptica geométrica. Este mesmo conceito pode ser explicado pela teoria da propagação de ondas electromagnéticas [1]. Numa primeira abordagem, a propagação é interpretada recorrendo às reflexões internas totais que ocorrem na interface núcleo/bainha, com base na lei de Snell. Uma

segunda abordagem baseia-se na equação não-linear de Schrödinger, derivada a partir das equações de Maxwell.

A teoria electromagnética estabelece que quando uma onda incide na fronteira de separação do núcleo com a bainha, parte dessa energia pode regressar ao núcleo, formando uma onda reflectida e outra parte dessa mesma energia pode ser transferida para a bainha, constituindo-se como uma onda refractada.

Como o núcleo possui um índice de refração de valor superior ao da bainha, existe um ângulo de incidência, em relação à normal da interface entre estes dois materiais, a partir do qual a energia se reflecte na totalidade para o núcleo. Esse ângulo é conhecido como ângulo crítico (θ_c).

Define-se o ângulo de aceitação, α , que constitui um dos factores importantes no desenho de dispositivos ópticos, como o ângulo máximo, para o qual a luz injectada na fibra, se vai propagar dentro do núcleo [2], como mostra a Figura 2-1. O ângulo de aceitação depende dos índices de refração do núcleo e da bainha e define um parâmetro denominado abertura numérica (NA – *Numerical Aperture*) [3-7].

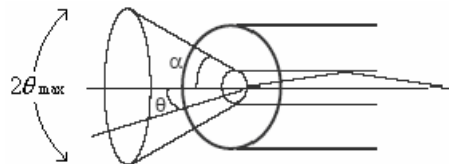


Figura 2-1: Raio de luz incidente com um ângulo menor ou igual ao ângulo de abertura do cone de aceitação ($\theta \leq \alpha$) propaga-se pela fibra [2].

A quantificação da abertura numérica é importante para determinar a quantidade da energia luminosa captada pela fibra e a eficiência de acoplamento da fonte radiante ao núcleo da fibra óptica.

As equações de Maxwell estabelecem que a transmissão de energia em guia de ondas pode ser descrita a partir de distribuições bem definidas do campo electromagnético [1]. Cada distribuição representa um modo de propagação, com características próprias (fase, velocidade de propagação, comprimento de onda, velocidade de grupo, etc.). O campo resultante no interior da fibra é a soma dos campos incidentes e reflectidos, que determinam uma distribuição específica no plano transversal à direcção de propagação.

Dadas as dimensões e diferenças de índice do núcleo e da bainha, existe uma quantidade finita de modos possíveis de transmitir numa fibra óptica. Para se determinar esse número, define-se um parâmetro denominado de frequência de corte normalizada (ou condição de corte para a propagação de um único modo na fibra), V , dada por [4-8]:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2-1)$$

onde a é o raio do núcleo e λ é o comprimento de onda do sinal. Um valor inferior a 2,405 correspondente à frequência normalizada limite para a propagação monomodal.

A equação não linear de Schrödinger (NLSE) é usada no estudo da propagação de impulsos na fibra óptica e, pode ser expressa do seguinte modo [9,11,12], quando apenas se consideram a atenuação, a dispersão de primeira ordem e os efeitos dependentes do índice de refração não linear:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 + \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (2-2)$$

onde $A(z,t)$ representa o envelope do campo eléctrico E , que se propaga na direcção z , ou seja, $E(x,y,z,t) = A(z,t)F(x,y)e^{j\beta_0 z - i\omega_0 t}$ e $F(x,y)$ é a distribuição modal do campo. A equação (2-2) está escrita na aproximação para um impulso com uma variação de amplitude lenta, ou seja, $A(z,t)$ é uma função que varia suavemente com z . Os parâmetros β_1 e β_2 relacionam-se, respectivamente, com a velocidade de grupo e com a dispersão de primeira ordem, α é a atenuação da fibra e $\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}}$ corresponde ao coeficiente não linear (derivado da dependência do índice de refração com a intensidade do campo que se propaga na fibra), onde n_2 , ω_0 , c e A_{eff} , representam, respectivamente, o índice de refração não linear, a frequência central do campo eléctrico, a velocidade da luz no vácuo e, a área efectiva do modo.

Contudo, e na prática, ocorrem situações em que as componentes de dispersão de ordem superior, tais como β_3 , têm também que ser consideradas. Casos simples desta situação relacionam-se, por exemplo, com sinais WDM e/ou sinais de grandes ritmos de transmissão. Nessas situações, inclui-se o termo proporcional a β_3 , na equação (2-2) ficando esta equação, após manipulação matemática, na forma seguinte [12]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \frac{i}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial T^3} + \frac{\alpha}{2} A = i\gamma |A|^2 A \quad (2-3)$$

a dispersão de segunda ordem é usualmente mais significativa na região em que $\beta_2 \cong 0$, conhecida como a região de comprimento de onda de dispersão nula.

Um outro parâmetro usado na caracterização das fibras ópticas monomodo é o diâmetro modal do campo (MDF - *mode-field diameter*), que inclui a dependência da penetração do campo em função do comprimento de onda, isto é, define a quantidade da radiação luminosa que é transportada no núcleo da fibra [2].

Nas fibras monomodo de índice em degrau, operando perto do comprimento de onda de corte, ou seja, perto da frequência normalizada limite para a propagação monomodal, o campo é bem aproximado por uma distribuição gaussiana, como mostra a Figura 2-2(a) [2]:

$$E(r) = E_0 \exp(-r^2 / W_0^2) \quad (2-4)$$

onde, r é o raio do modo, E_0 representa o campo eléctrico no ponto onde $r = 0$ e, W_0 é a largura da distribuição do campo eléctrico. A largura do MDF ($2W_0$) pode ser determinada por [2]:

$$2W_0 = 2 \left[\frac{2 \int_0^\infty r^3 E^2(r) dr}{\int_0^\infty r E^2(r) dr} \right]^{1/2} \quad (2-5)$$

nesta situação, o MDF pode ser definido, como a distância entre os pontos para os quais a amplitude do campo decai $1/e^2$, do seu valor máximo, Figura 2-2(b).

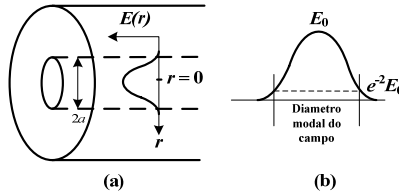


Figura 2-2: Representações do campo eléctrico (a) e do MDF (b).

Na ligação entre fibras, o valor de perdas de inserção (em dB), por conexão, pode ser estimado, sendo conhecidos os MDFs das fibras a ligar [1,2]:

$$\text{Perdas inserção}_{\text{MDF}}(\lambda) = -10 \times \log_{10} \left(\frac{2w_1(\lambda)w_2(\lambda)}{(w_1(\lambda))^2 + (w_2(\lambda))^2} \right)^2 \quad (2-6)$$

2.2 Factores que limitam a transmissão nas fibras ópticas monomodo

Em sistemas de comunicação ópticos, a fibra óptica é o elemento central do canal de comunicação e por esse motivo, esta secção é dedicada a sua caracterização e ao estudo das suas principais potencialidades e limitações. Dedicamos especial atenção a redes ópticas passivas e, dentro destas, particularmente às redes ópticas constituídas por fibras de dispersão deslocada.

2.2.1 Efeitos lineares nas fibras ópticas

Vários fenómenos físicos são responsáveis pela degradação dos sinais na fibra óptica. De um modo geral, consideram-se os efeitos lineares, embora dependentes do comprimento de onda, independentes da potência acoplada na fibra, enquanto que os efeitos não lineares dependem fortemente da potência óptica e do comprimento de onda.

A **atenuação** resulta de diversos mecanismos, sendo constituída maioritariamente pelas perdas introduzidas por: absorção material, espalhamento e curvaturas da fibra. Considerando uma dada potência acoplada numa fibra (P_{IN}) a potência à saída (P_{OUT}) é dada pela expressão [2]:

$$P_{OUT} = 10^{-\frac{\alpha L}{10}} P_{IN} \quad (2-7)$$

onde α é o coeficiente de atenuação, que inclui além da absorção material, as perdas por espalhamento do sinal e, L representa o comprimento da ligação, expresso em km.

A **dispersão** nas fibras monomodo é devida a dispersão intramodal, sendo o fenómeno igualmente conhecido como dispersão da velocidade de grupo (GVD – *Group Velocity Dispersion*) [2,9]. Na Figura 2-3 exemplifica-se a magnitude da dispersão em fibras monomodo; padrão, dispersão deslocada e, dispersão aplanada.

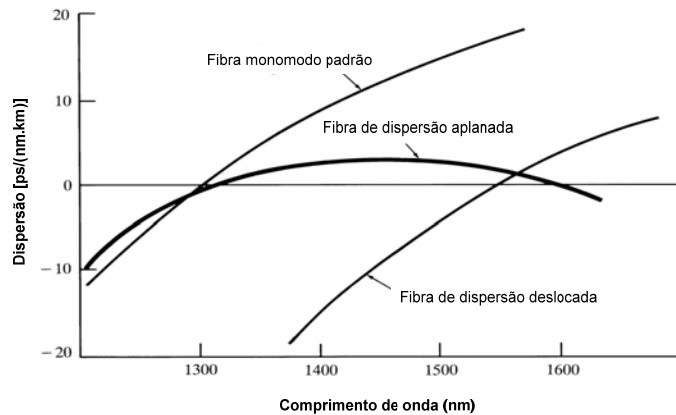


Figura 2-3: Exemplos de magnitude da dispersão em vários tipos de fibra monomodo [2].

A dispersão ocorre devido à largura espectral da fonte óptica. Devido a essa dependência o efeito da distorção do sinal aumenta com a largura espectral da fonte. Um determinado sinal policromático sujeito a uma dispersão positiva, verá os seus comprimentos de onda mais longos viajarem mais lentamente que os comprimentos de onda mais curtos, enquanto que um sinal sujeito a dispersão negativa, verá a situação contrária [13,14].

Em sistemas de comunicação ópticos, é comum usar-se o parâmetro de dispersão D , definido por [10]:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2-8)$$

usualmente expresso em ps/nm/km.

O coeficiente de dispersão cromática (D) é definido como a alteração do atraso de um impulso óptico por unidade de comprimento da fibra provocado pela mudança unitária do comprimento de onda.

A inclinação no ponto de dispersão nula (S_0) é, por definição, a razão da variação do coeficiente de dispersão cromática em função do comprimento de onda, na região onde o comprimento de onda tem dispersão nula. O comprimento de onda de dispersão nula é, por sua vez, o comprimento de onda para o qual a dispersão cromática é nula.

Nas fibras de dispersão deslocada, o coeficiente de dispersão cromática pode ser obtido através da seguinte expressão [15]:

$$D(\lambda) = (\lambda - \lambda_0) S_0 \quad (2-9)$$

onde S_0 representa a inclinação (uniforme) de dispersão nula.

Para avaliar a penalidade imposta pela dispersão cromática na propagação dos impulsos no interior de uma fibra óptica monomodo, recorreu-se a uma ferramenta de simulação o programa VPI TransmissionMaker. Na Figura 2-4 mostra-se a montagem usada no simulador para essa avaliação a um ritmo de transmissão de 10 Gb/s.

Na avaliação usaram-se parâmetros da dispersão para 1550 nm; de 1,7 e de 16 ps/nm.km, valores esse, compatíveis com fibras monomodo, respectivamente, de dispersão deslocada (DSF) e padrão (SMF). Nas situações testadas, o valor da atenuação e da dispersão, mantêm-se constantes ao longo da linha de transmissão.

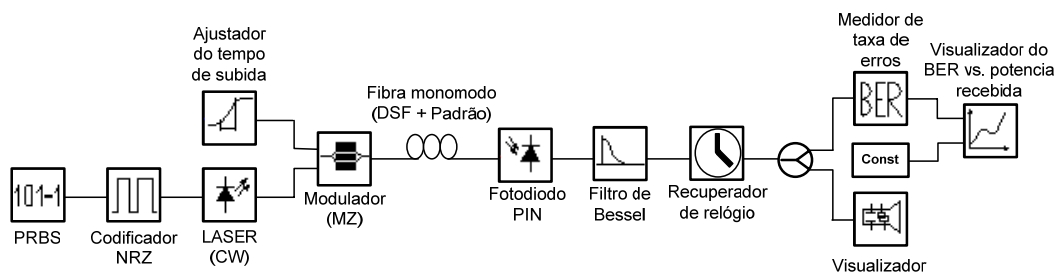


Figura 2-4: Montagem para avaliação da penalidade resultante do efeito da dispersão.

Por sua vez, no gráfico da Figura 2-5 comparam-se as taxas de erros dos impulsos após detecção, nas duas situações atrás descritas após percorrerem 130 km de fibra. Para efeito da determinação da penalidade de potência imposta pela dispersão, apresenta-se igualmente a curva sem o efeito da dispersão ($D = 0$).

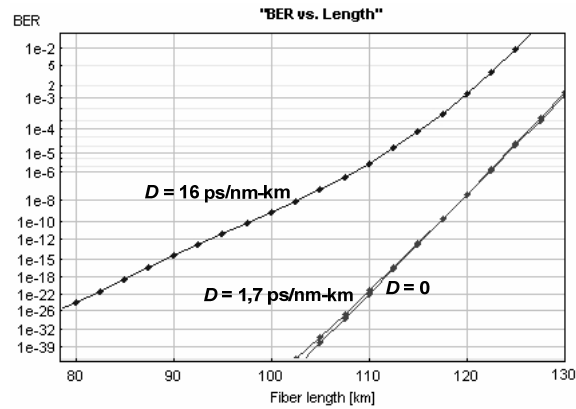


Figura 2-5: Penalidade resultante do efeito da dispersão cromática em fibras ópticas monomodo.

Nas situações avaliadas e, para uma taxa de erros (BER) de 10^{-12} , verifica-se que um sinal óptico pode percorrer ~116 km quando a dispersão assume valores entre 0 e 1,7 ps/nm.km e baixa para cerca de 93 km quando esse valor é de 16 ps/nm.km. Os valores medidos da potência óptica recebida foram: -22,41; -22,39 e -17,34 dBm, para os valores de dispersão avaliados: 0; 1,7 e 16 ps/nm.km, respectivamente.

O valor limite da atenuação, de forma a garantir-se no receptor uma taxa de erros $\leq 10^{-12}$, é de ~32 dB na fibra DSF e de ~27 dB na fibra SMF. Dos valores obtidos da potência óptica recebida, conclui-se que a penalidade resultante da dispersão é de 0,02 e 5 dB, quando a dispersão assume os valores de 1,7 e 16 ps/nm.km, respectivamente.

Uma forma prática de fazer a avaliação da propagação dos impulsos é pela visualização do diagrama de olho, considerado um indicador da qualidade de desempenho de um sistema. A recomendação G.957 [16] da ITU-T especifica máscaras para diagramas de olho de diferentes sistemas de comunicação ópticos, da qual a Figura 2-6 mostra um exemplo.

A medição do diagrama de olho é feita no domínio do tempo e permite verificar, num osciloscópio, os efeitos da distorção numa dada forma de onda. Um diagrama de olho aberto corresponde ao mínimo de distorção. A distorção do sinal devido ao ruído ou à interferência intersimbólica resultará num diagrama de olho fechado. A recomendação G.692 [17] da ITU-T define para sistemas de comunicação ópticos uma probabilidade de erro não inferior a 10^{-12} .

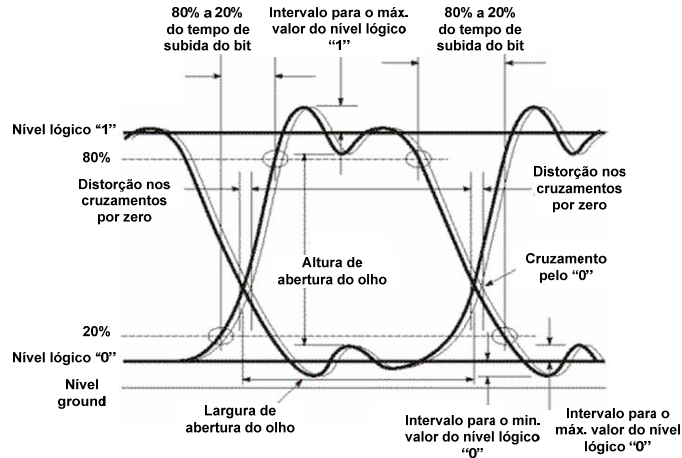


Figura 2-6: Representação de um diagrama de olho onde se destacam os principais parâmetros extraíveis da sua observação [16].

Os diagramas da Figura 2-7 mostram representações do diagrama de olho para as taxas de erros de 10^{-12} e de 10^{-3} , relativamente ao gráfico da Figura 2-5, com $D = 1,7$ ps/nm.km e, para distância percorridas na fibra de: (a) 116 km e (b) 130 km.

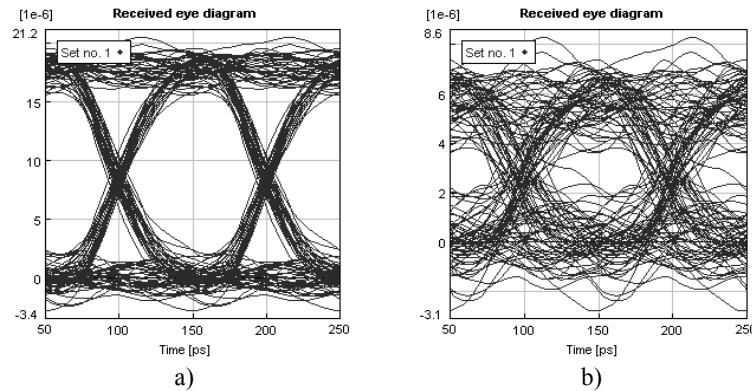


Figura 2-7: Representações de diagrama de olho correspondentes: em a) a uma taxa de 10^{-12} e em b) a uma taxa de erros de 10^{-3} .

No exemplo da Figura 2-8, alterando-se a configuração da Figura 2-4, com a inclusão de um atenuador variável, antes da detecção (fotodiodo PIN), pretende observar-se a variação da taxa de erros com a variação da potência. Os principais parâmetros da fibra, compatíveis com fibra DSF, são: $\alpha = 0,25$ dB/km, $D = 0,1$ ps/nm.km, numa distância (L) de 130 km a percorrer na fibra óptica. A potência óptica injectada na fibra é de 7 dBm. Na figura (2-8), a curva sem o efeito da atenuação, corresponde a ligação emissor/receptor sem a fibra a interligar os sistemas, nessa situação, apenas o efeito do atenuador variável é considerado. Pelo contrário, na curva correspondente aos sistemas interligados pela fibra, consideram-se igualmente os efeitos da atenuação e da dispersão.

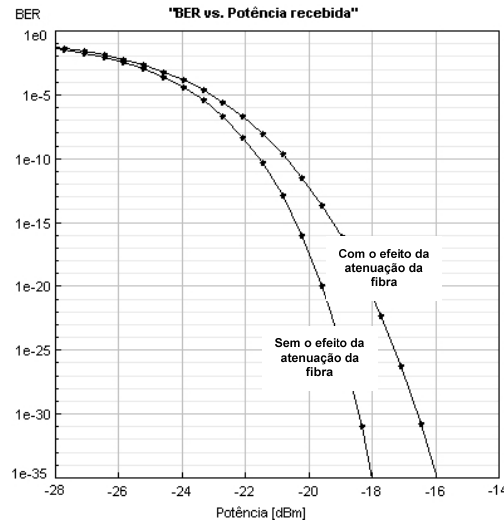


Figura 2-8: Efeito da atenuação num sinal óptico, avaliado em termos da potencia óptica que chega ao receptor versus taxa de erros, com $D = 0,1 \text{ ps/nm-km}$, num comprimento de fibra de 130 km.

Por último, na Figura 2-9 pode ser observado o efeito conjunto da atenuação e da dispersão em dois tipos de fibras monomodo; a) padrão (SMF) e b) de dispersão deslocada (DSF).

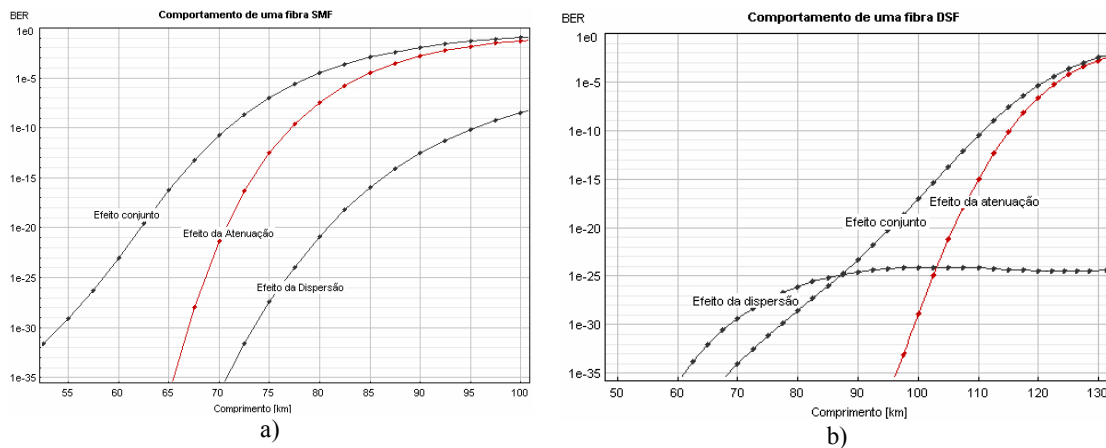


Figura 2-9: Comportamento de dois tipos de fibra monomodo em função da atenuação e da dispersão: a) SMF e b) DSF.

Da observação da Figura 2-9 concluiu-se que o efeito da dispersão e da atenuação torna-se notório, sendo visível que a dispersão domina até cerca dos 65 km (no caso da fibra SMF), e a partir desse ponto, a degradação é devida a um efeito conjunto da dispersão com a atenuação. Contrariamente, na fibra DSF, é o efeito conjunto da dispersão com a atenuação que degradam o impulso e, a partir dos 90 km, o efeito que predomina é o da atenuação. Esta situação permite concluir que as redes ópticas constituídas por fibras SMF são mais rapidamente limitadas pela dispersão que as constituídas por fibras DSF, as quais são mais limitadas pela atenuação.

A **dispersão dos modos de polarização (PMD)** tem origem numa característica da fibra óptica designada de birrefringência [2], a qual, pode ser consequência de múltiplos factores intrínsecos da fibra, como irregularidade na geometria do núcleo, pequenos desvios à simetria cilíndrica do núcleo da fibra, por exemplo, ou tensões aplicadas na fibra ao longo do seu comprimento.

Factores externos tais como curvaturas, torcidas ou apertos na fibra, podem conduzir igualmente à birrefringência. Dado que qualquer um desses mecanismos pode acontecer aleatoriamente em qualquer cabo instalado, faz com que a birrefringência varie ao longo do comprimento de uma ligação óptica e ao longo do tempo.

Uma forma prática de avaliação do efeito da PMD é verificar o estado de polarização de um sinal óptico que se propaga numa fibra com birrefringência variável. A polarização refere-se à orientação do campo eléctrico, a qual varia ao longo do comprimento de uma fibra. Como se mostra na Figura 2-10, a energia de um sinal óptico, para um dado comprimento de onda, ocupa dois modos de polarização. Uma variação de birrefringência causará que, cada modo de polarização viaje a velocidades ligeiramente diferentes. A diferença dos tempos de propagação resultante entre os dois modos de polarização, $\Delta\tau$, resultará no alargamento do impulso.

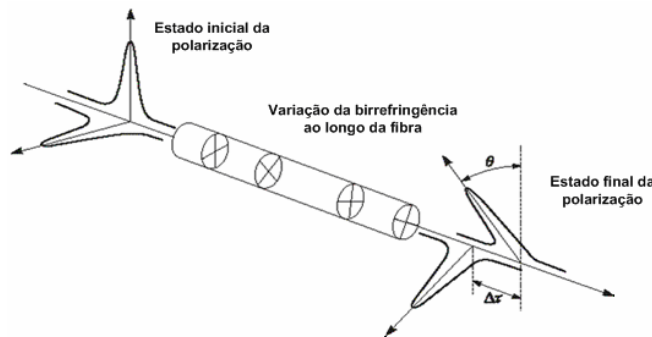


Figura 2-10: Representação esquemática da variação do estado da polarização de um impulso óptico quando se propaga numa fibra com birrefringência variável ao longo do seu comprimento [2].

Em virtude dos sistemas de ritmos de transmissão mais elevados estarem limitados na distância, devido ao efeito da PMD, é importante conhecer essa mesma distância quando se dimensionam os percursos ópticos. Esta distância limite estima-se usando a seguinte expressão [15]:

$$L = \left(\frac{0,1}{B D_{\text{PMD}}} \right)^2 \quad (2-10)$$

onde L é a distância imposta pelo efeito da PMD, B é o ritmo de transmissão do sinal óptico e, D_{PMD} é o coeficiente da PMD medido na fibra.

Uma forma de caracterizar a PMD numa fibra longa é através do seu valor médio relativamente ao atraso diferencial de grupo ($\Delta\tau_{pol}$), que pode ser determinado por [2]:

$$\langle \Delta\tau_{pol} \rangle \approx D_{PMD} \sqrt{L} \quad (2-11)$$

onde D_{PMD} (expresso em $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$), corresponde ao parâmetro do valor médio da PMD.

Com recurso à simulação pode ser verificado o efeito da birrefringência na propagação de impulsos NRZ no interior de uma fibra óptica monomodo. No exemplo da Figura 2-11, a fonte óptica emite uma potência de 1 mW em 1550 nm, com um ritmo de transmissão de 2,5 Gb/s. O comprimento total da ligação é de 100 km. A fibra óptica tem um coeficiente de atenuação de 0,25 dB/km.

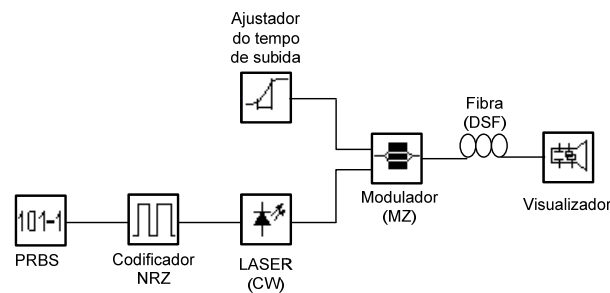


Figura 2-11: Montagem para simulação do efeito da PMD na propagação de impulsos NRZ numa fibra óptica monomodo de dispersão deslocada.

Fazendo variar o valor do coeficiente da PMD entre valores extremos; $5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ e $0,5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ (este último valor constitui o limite máximo da recomendação G.653 [18] da ITU-T), pode ser verificado em que medida o comportamento dos impulsos é afectado (Figura 2-12).

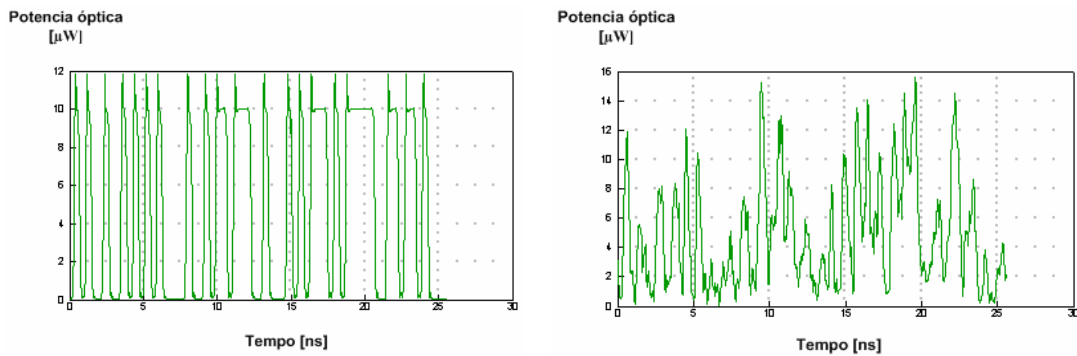


Figura 2-12: Diagrama temporal; a) Para uma PMD de $0,5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ e b) Para uma PMD de $5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$.

Em conclusão, a PMD é um fenómeno físico que ocorre nas fibras ópticas e provoca a dispersão dos impulsos ópticos no tempo. Se a quantidade de dispersão for excessiva, haverá sobreposição de impulsos adjacentes resultando daí a interferência de uns com outros. Esta

interferência resultará no incremento da taxa de erros. O efeito da dispersão dos bits é acumulativo com a distância.

2.2.2 Efeitos não lineares em fibras ópticas monomodo

Os efeitos não lineares podem ser enquadrados em duas categorias: a primeira diz respeito à variação do índice de refração da fibra em função da potência óptica e a segunda relativamente aos processos de dispersão não lineares.

Na primeira categoria enquadram-se os efeitos de auto modulação de fase, modulação de fase cruzada e mistura de quatro ondas, enquanto na segunda categoria se situam os efeitos da dispersão estimulada de Raman e de Brillouin [2,19-23].

É importante contudo notar-se que nem sempre as não linearidades são penalizadoras, os amplificadores de Raman, por exemplo, são uma boa forma de rentabilizar este tipo de efeitos num meio, tal como o efeito FWM na conversão de sinais ópticos.

Uma outra forma de agrupar estes efeitos é verificar em que medida são elásticos ou inelásticos. Efeitos elásticos são aqueles em que o sinal é afectado pela presença de um material, interagindo com ele, não existindo contudo, troca de energia entre estes, o exemplo mais significativo é o efeito FWM. Diferentemente, os efeitos inelásticos são aqueles onde existe transferência de energia entre o material e o sinal, como sejam os casos dos efeitos da dispersão estimulada de Raman e de Brillouin [2,19-23].

Define-se como comprimento efectivo de interacção, L_{eff} , como o comprimento para o qual um sinal de potência constante iria sofrer os mesmos efeitos não lineares. Para uma fibra com um coeficiente de atenuação, α , L_{eff} é definido por [2]:

$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{P_0} \int_0^L P(z) dz = \int_0^L e^{-\alpha z} dz = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (2-12)$$

onde L representa o comprimento real do percurso óptico. Para fibras longas tem-se $L_{\text{eff}} \approx 1/\alpha$, a corresponde um comprimento efectivo ≈ 20 km, em 1550 nm, com $\alpha = 0,22$ dB/km [24,25]. Os efeitos das não linearidades crescem com a potencia óptica injectada na fibra.

2.2.2.1 Dispersão estimulada da luz

Quando um sinal óptico viaja no interior de um material, interacções podem ocorrer entre o sinal e o meio. Essas interacções podem produzir alterações ao próprio sinal e provocar interacções entre sinais diferentes actuando o material como intermediário.

A interacção do sinal com o material na fibra óptica é reduzida e, portanto, interacções entre diferentes sinais na mesma fibra são também igualmente reduzidas. Contudo, e uma vez que o sinal se propaga a longas distâncias, no interior da fibra, alguns pequenos efeitos têm condições para se acumularem tornando-se significativos.

A **dispersão estimulada de Brillouin (SBS)** consiste na retro dispersão do sinal na direcção do transmissor induzida por um mecanismo que ocorre no meio físico de transmissão, a fibra óptica [12,38-41]. A onda reflectida produzida pelo efeito SBS é conhecida como “onda de Stokes”. O seu efeito normalmente não se faz sentir em ligações normais, mas pode ser significativo nas situações em se usem lasers com largura espectral muito estreita e níveis de potência elevados.

Um critério usado na determinação do ponto a partir do qual a SBS constitui um problema é considerar um determinado patamar de potência (Pb_{th}), que corresponde ao nível da luz retro dispersa ser da mesma ordem de grandeza da potência do sinal injectado na fibra. Este nível de potência pode ser aproximado através da expressão seguinte [9]:

$$Pb_{th} \approx 21 \frac{A_{eff} b}{g_B L_{eff}} \left(1 + \frac{\Delta v_{fonte}}{\Delta v_B} \right) \quad (2-13)$$

onde A_{eff} , e L_{eff} são, a área efectiva e o comprimento efectivo, vistos anteriormente, b é o factor de polarização (que toma os valores de 1 ou 2, dependendo da polarização relativa do sinal na fibra e da onda retro dispersa) e, g_B é o coeficiente do ganho de Brillouin, cujo valor é de $\sim 4 \times 10^{-11}$ m/W, independentemente do comprimento de onda [9]. A expressão anterior mostra que o patamar da SBS aumenta com a largura espectral da fonte óptica.

A **dispersão estimulada de Raman (SRS)** ocorre através de mecanismos similares aos que concorrem na produção da SBS. No entanto o âmbito das interacções é devido a vibrações moleculares, contrariamente ao que ocorre na SBS [9,22,26,42,43]. A dispersão da luz pode ocorrer em qualquer das direcções, quer na direcção da propagação do sinal, quer rectro difundida.

Assim, o efeito SRS pode limitar severamente o desempenho de um sistema de comunicação óptico multicanal. Na presença de canais múltiplos, a energia é transferida de canais situados nos comprimentos de onda mais curtos para canais vizinhos que usem comprimentos de ondas mais

longos. A potência de canais WDM separados até 16 THz, aproximadamente 125 nm para a região espectral em torno de 1550 nm, pode ser acoplada devido ao efeito SRS [2,9].

De forma análoga à SBS, define-se uma potência de patamar de Raman (Pr_{th}) como o nível de potência incidente na fibra para o qual metade desta potência é transferida para o campo de Stokes na extremidade oposta de uma fibra, com comprimento L . Esse valor pode ser estimado a partir de [2, 9]:

$$Pr_{th} \approx 16 \frac{A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (2-14)$$

onde, g_R é o ganho de Raman ($\sim 6 \times 10^{-13}$ m/W em 1550 nm [9]) e, L_{eff} e A_{eff} são, respectivamente o comprimento e a área efectiva da fibra.

Conquanto o efeito SRS não seja verdadeiramente significativo em sistemas monocal canal pode contudo ser problemático em sistemas WDM. Este fenómeno pode também ser utilizado na construção de amplificadores ópticos baseados em SRS.

2.2.2.2 Modulação não linear de fase

A presença de um sinal óptico numa fibra causa uma pequena alteração no seu índice de refração. Este fenómeno tem origem no campo electromagnético que se estabelece quando o sinal actua sobre os átomos e moléculas que constituem a fibra e é conhecido como efeito de Kerr [2,9].

Nas situações em que a intensidade do sinal é baixa, o efeito é praticamente linear. Uma característica importante do efeito de Kerr, faz com que o crescimento da intensidade luminosa torne o efeito extremamente não linear [29-31]. Dependendo do nível da potência injectada na fibra, o efeito de Kerr pode ter diversas formas de se manifestar, bem como de contribuir, para a melhoria (por exemplo, na compensação da dispersão por efeito do solitão), ou degradação do sinal.

Como resultado do efeito de Kerr, as variações que o índice de refração da fibra óptica é sujeito, causado pela presença de um impulso óptico, são diferentes para diferentes pontos espaciais do impulso [28,32,44]. Como consequência deste efeito, durante a propagação, o campo eléctrico adquire um desvio de fase não linear. Este fenómeno é designado por **auto modulação de fase (SPM)**.

O efeito SPM pode então ser referido como a fase adquirida pelo campo eléctrico na sua propagação ao longo de uma fibra e pode ser quantificada através da expressão seguinte [2,9]:

$$\phi_{NL} = \int_0^L (\beta' - \beta) dz = \int_0^L \gamma P(z) dz = \gamma P_{in} L_{eff} \quad (2-15)$$

onde $P(z) = P_{in} \exp(-\alpha z)$ tem em conta as perdas na fibra, γ é o coeficiente não linear e L_{eff} é o comprimento efectivo de interacção. Para reduzir o efeito da SPM nos sistemas de comunicação ópticos, é necessário que $\phi_{NL} \ll 1$ [2].

As variações transitórias do índice de refacção da fibra, resultarão em variações igualmente transitórias na fase do impulso, representadas na Figura 2-12 (dada por $d\phi/dt$). Como consequência dessas alterações, a frequência óptica instantânea (*chirp*) do sinal irá variar relativamente ao seu valor inicial, no interior do impulso, isto é, dado que as flutuações da fase são dependentes da intensidade, diferentes partes do impulso serão sujeitas a diferentes desvios de fase, fazendo com que o flanco posterior do impulso seja trasladado para frequências mais elevadas, enquanto que o flanco anterior do impulso experimentará o efeito inverso. Dado que o *chirp* depende da potência óptica transmitida, os efeitos da SPM são mais pronunciados em impulsos de elevada intensidade.

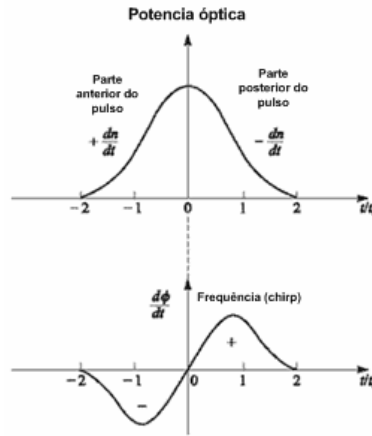


Figura 2-13: Representação do alargamento espectral de um impulso devido ao efeito SPM [2].

Devido ao alargamento do espectro induzido pela dispersão cromática, a variação temporal da fase originada pela SPM, pode resultar em penalidade de potência, dependendo da janela de comprimentos de onda de operação.

Na região de comprimentos de onda onde a dispersão é negativa, o flanco anterior do impulso irá afastar-se mais rapidamente do centro que o flanco posterior. Nesta situação, o *chirping*, agrava o efeito da dispersão cromática, ao alargar ainda mais o impulso. Contrariamente, na região onde a dispersão é positiva, o flanco anterior do impulso irá mover-se mais lentamente no sentido do centro, que o flanco posterior, contribuindo desta forma, para compensar parcialmente o efeito da dispersão cromática.

A **modulação cruzada de fase (XPM)**, tal como a SPM, tem origem na característica de dependência da intensidade do índice de refacção e manifesta-se nos sistemas de transmissão

multicanal, produzindo um desvio de fase, dependente da intensidade. Esse desvio de fase para um canal particular, depende em simultâneo da potência injectada nesse canal e da potência dos outros canais que se propaguem conjuntamente. O desvio total de fase para o canal j , é [2,9]:

$$\phi_j^{\text{NL}} = \gamma L_{\text{eff}} \left(P_j + 2 \sum_{n \neq j}^N P_n \right) \quad (2-16)$$

onde o somatório da equação (2-16) tem em conta a contribuição da potência dos n canais que se propagam na mesma fibra. Se for assumido transmitir a mesma potência em todos canais, então, o desvio de fase, para o pior caso, ou seja, quando os impulsos se sobrepõem e todos os canais transmitem “1” simultaneamente, é:

$$\phi_j^{\text{NL}} = (\gamma / \alpha) (2N - 1) P_j \quad (2-17)$$

Em sistemas de comunicação ópticos muito longos, como é o caso das ligações internacionais e submarinas, o efeito do alargamento do espectro provocado pela SPM e a XPM, quando combinados com a dispersão na fibra, torna-se mais evidente [45,46].

2.2.2.3 Diafonia intercanal

A diafonia intercanal (*interchannel crosstalk*) constitui-se como uma das limitações mais importantes na implementação de sistemas WDM. Este fenómeno degrada a transmissão uma vez que ocorre a transferência de potência entre canais. Esta transferência é devida aos efeitos não lineares nas fibras ópticas, o efeito FWM, por exemplo, sendo conhecida como diafonia não linear. Um outro tipo de diafonia, dito linear, pode existir em alguma percentagem devido a imperfeições dos diversos dispositivos WDM (tais como; filtros, desmultiplexadores e comutadores).

A **diafonia linear** pode ser classificada em duas categorias, dependendo da sua origem: **diafonia fora de banda** e **diafonia dentro da banda**. A diafonia dentro da banda ocorre ao nível do encaminhamento dos sinais dentro dos diversos nós de uma rede WDM e é mais gravosa devido ao facto da interferência cair completamente dentro da mesma largura espectral recebida [2,9].

Para avaliar o efeito da **diafonia dentro da banda**, considere-se o comutador óptico da Figura 2-14 no qual as portas 1 e 2 recebem dois sinais independentes no mesmo comprimento de onda (λ_1). Os sinais são comutados para as saídas, do seguinte modo; porta 1 > porta 4 e porta 2 > porta 3. No processo de comutação, uma fracção da potência do sinal que entra na porta 1 é acoplada na porta 3, onde interfere com o sinal vindo da porta 2.

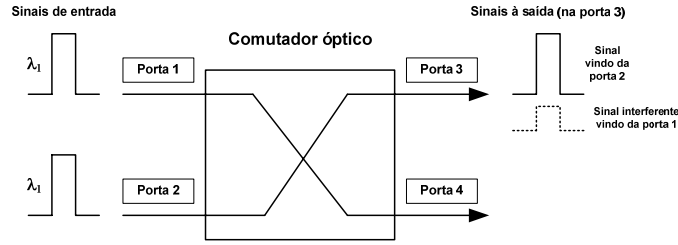


Figura 2-14: Ilustração do efeito da diafonia num componente das redes WDM (comutador óptico).

Considerando agora, que a potência média recebida do sinal interferente é uma fracção, ε , da potência média (P) do sinal recebido na porta 3, então, num sistema com amplificação, a penalidade de potencia resultante é [2]:

$$\delta_{\text{intra}} = -5 \log_{10} (1 - 2\sqrt{\varepsilon}) \quad (2-18)$$

Relativamente há **diafonia fora de banda**, considerando igualmente que a potência de diafonia é uma fracção, ε , da potência do sinal recebido (P), e considerando novamente um sistema com amplificação, a penalidade de potência nessa situação é [2]:

$$\delta_{\text{inter}} = -5 \log_{10} (1 - \varepsilon) \quad (2-19)$$

O gráfico da Figura 2-15 foi construído a partir das equações 2-18 e 2-19, para sistemas WDM de 4, 8 e 16 canais, onde cada canal individual contribui em igual percentagem para a potência total de diafonia.

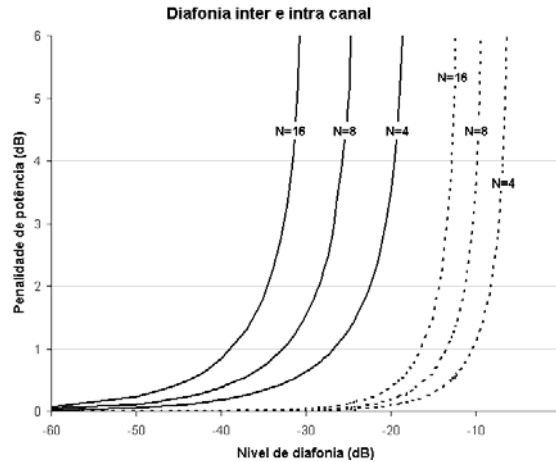


Figura 2-15: Penalidade de potência para sistemas WDM (4, 8 e 16 canais) devida a diafonia dentro de banda (linhas a cheio) e fora de banda (linhas a ponteadas).

A Figura 2-15 evidencia o comentado anteriormente relativamente ao facto da diafonia dentro da banda, ser mais penalizante nos sistemas WDM. Assim, e para uma penalidade de potência de 1 dB, por exemplo, a diafonia dentro da banda, num sistema WDM de 16 canais, surge

quando o nível de diafonia é sensivelmente 40 dB abaixo do nível de sinal. Na diafonia fora de banda, para a mesma penalidade de potência, este nível é muito superior (cerca de 16 dB abaixo do nível do sinal).

A **diafonia intercanal não linear**, tem origem nos processos, discutidos anteriormente, relativamente aos efeitos SBS e SRS e no efeito FWM, que se estuda na secção seguinte. Estes processos, resultam em ganhos ou perdas ao nível do comprimento de onda dos canais na dependência da intensidade de um sinal óptico.

Dos efeitos não lineares provêm ganhos em alguns canais enquanto outros sofrem uma depleção da potência óptica, produzindo em consequência, o fenómeno da diafonia entre os canais transmitidos. A SPM e a XPM afectam unicamente a fase dos sinais, originando o efeito de *chirp* nos impulsos. Este fenómeno é particularmente gravoso devido ao alargamento dos impulsos sob o efeito da dispersão, especialmente em sistemas de elevados ritmos de transmissão (> 10 Gb/s).

Qualquer dos efeitos não lineares contribui para a degradação dos sinais enquanto se propagam na fibra, requerendo uma determinada quantidade de potência óptica adicional no receptor, para contrabalançar os seus efeitos. Este fenómeno é conhecido como a penalidade de potência para cada um dos efeitos.

2.2.2.4 Mistura de Quatro Ondas (FWM)

O efeito FWM é análogo à distorção de intermodulação nos sistemas eléctricos [2,9] e ocorre quando se transmite numa mesma fibra canais ópticos espacialmente próximos da região do comprimento de onda de dispersão nula, originando a mistura de três frequências ópticas (ν_i, ν_j, ν_k), para produzir um quarto produto de intermodulação ν_{ijk} , dado por [2]:

$$\nu_{ijk} = \nu_i + \nu_j - \nu_k \text{ com } i, j \neq K \quad (2-20)$$

quando as novas frequências geradas ocorre dentro da janela de transmissão das frequências originais, pode provocar o fenómeno da diafonia.

A mistura de quatro ondas tem sido estudada extensivamente [19,25,27,33-37] pois pode ser muito eficiente para gerar novas frequências, mas também em consequência disso, constitui-se como uma séria condicionante na implementação de sistemas WDM. Este fenómeno é resultado do efeito não linear de Kerr e baseia-se na susceptibilidade de terceira ordem $\chi^{(3)}$, sendo descrito recorrendo à representação gráfica da Figura 2-16.

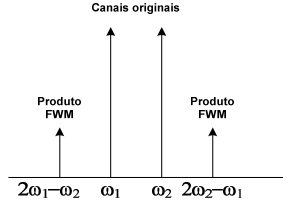


Figura 2-16: Ilustração do efeito FWM.

Um sinal com a frequência, ω_1 , é combinado com um sinal de frequência, ω_2 , para produzir dois novos sinais; um com a frequência, $2\omega_1 - \omega_2$, e um segundo com frequência, $2\omega_2 - \omega_1$. Este efeito ocorre igualmente se mais sinais forem combinados, originando novas combinações e arranjos de frequências.

Dado que a FWM é um processo sensível à fase (isto é, as interações dependem das fases relativas das portadoras ópticas envolvidas), os seus efeitos podem acumular-se eficientemente sobre longas distâncias numa fibra. Dado esse facto, a eficiência do efeito FWM é dependente da dispersão na fibra e do espaçamento entre portadoras ópticas (canais), dado requer condições de concordância (coerência) de fase entre estas [2,9]. Essa situação é favorecida quando se usam espaçamentos iguais entre canais e é regida pelo parâmetro da discordância de fase [9,47]:

$$\begin{aligned} \Delta k &= \beta_F + \beta_k - \beta_i - \beta_j \approx \beta_2 (\omega_i - \omega_k) (\omega_j - \omega_k) \\ &= \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^2} \cdot S_0 \cdot \left(\frac{\lambda_i + \lambda_j}{2} - \lambda_0 \right) \cdot (\lambda_i + \lambda_k) \cdot (\lambda_j + \lambda_k) \end{aligned} \quad (2-21)$$

onde as constantes de propagação (β_m) foram expandidas numa série de Taylor em torno de $\omega_c = (\omega_i + \omega_j)/2$ e β_2 é o parâmetro GVD para essa frequência particular. A eficiência FWM relaciona-se com o parâmetro da discordância de fase, Δk , através de [33,47-49]:

$$\eta_F = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta k^2} \cdot \left[1 + \frac{4 \cdot \exp(-\alpha \cdot L) \cdot \sin\left(\Delta k \cdot \frac{L}{2}\right)}{(1 - \exp(-\alpha \cdot L))^2} \right] \quad (2-22)$$

da relação dada pela equação (2-22), concluiu-se que a eficiência FMW é maximizada com $\Delta k = 0$, ou seja, quando a concordância de fase entre canais é alcançada.

Por último, a equação (2-23), permite obter numa estimativa, a eficiência do efeito FWM (η_F), através da potência transferida para cada produto FWM gerado, numa fibra com comprimento L [9]:

$$P_F = \eta_F (d_F \gamma L)^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \quad (2-23)$$

onde $P_{i,j,k}$ é a potência óptica injectada na fibra, por canal, d_F representa o factor degenerativo, cujo valor é 1 (com $i = j$) e 2 (com $i \neq j$) e γ e α , representam, o coeficiente não linear e de atenuação

da fibra, respectivamente. O coeficiente não linear (γ), dado por: $\gamma = 2\pi \frac{\bar{n}_2}{A_{\text{eff}}} \frac{1}{\lambda}$, expresso por $(\text{W.km})^{-1}$, onde, \bar{n}_2/A_{eff} é a constante não linear; \bar{n}_2 é o índice de refração não linear, que toma o valor de $2,6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, para a Sílica pura [2] e A_{eff} tem um valor nominal (nas fibras DSF) de $55 \mu\text{m}^2$.

Com recurso à simulação, o efeito FWM pode ser avaliado na transmissão de quatro canais WDM numa fibra monomodo de dispersão deslocada. A separação assumida entre canais ($\Delta\nu_s$) foi de 50 GHz. Cada emissor emite uma potência óptica de 2 mW e um ritmo de transmissão de 10 Gb/s. O primeiro canal emite na frequência 193,025 THz. A ligação óptica tem um comprimento total de 100 km e, a fibra, tem os seguintes parâmetros: $\alpha = 0,25 \text{ dB/km}$; $D = 0,12 \text{ ps/nm.km}$ em 193,1 THz e $S_0 = 0,073 \text{ ps/nm}^2.\text{km}$. A Figura 2-17 mostra o diagrama de blocos, usado no simulador para avaliação do efeito FWM.

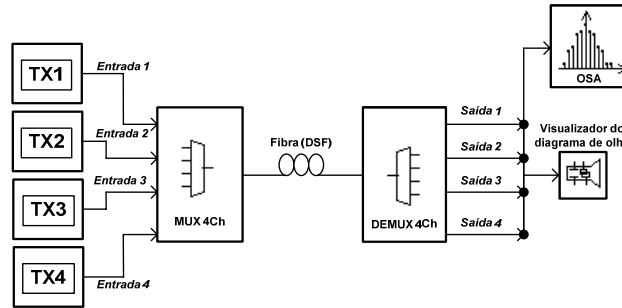


Figura 2-17: Modelo usado na avaliação do efeito FWM, transmitindo 4 canais com espaçamento de 50 GHz, com centro na frequência óptica 193,1 THz, a um ritmo de 10 Gb/s.

Após correr a simulação obteve-se um espectro de frequências que inclui os canais originais (os 4 centrais na Figura 2-18) e alguns dos produtos gerados no processo FWM. Dado ter-se usado um espaçamento uniforme entre os canais originais (50 GHz), os produtos FWM gerados, encontram-se também eles, com espaçamentos desse valor.

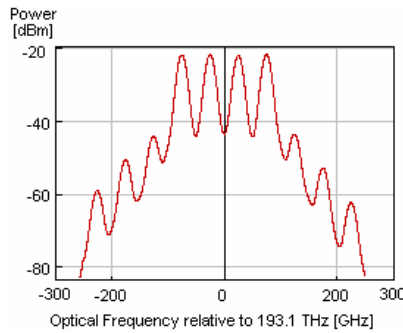


Figura 2-18: Espectro de frequência, visualizado num sistema WDM de 4 canais, usando espaçamento igual entre canais (50 GHz), após percorrerem 100 km de fibra DSF.

Em geral, para um número N de canais injectados na fibra, existirá um número de produtos FWM gerados, M , dado por [2]:

$$M = \frac{N^2}{2}(N-1) \quad (2-24)$$

no exemplo anterior os produtos FWM gerados serão pelo menos em número de 24.

Fazendo uma estimativa da potência dos produtos FWM pela leitura do espectro de frequências da Figura 2-18, podemos determinar a eficiência FWM de dois produtos, em situações extremas (maior e menor potência), usando a equação (2-23).

Assim, e para um dos produtos FWM de maior potência localizado em 193,225 THz (canal 8) têm-se ~ -42 dBm ($6,3 \times 10^{-8}$ W) e para um dos produtos de menor potência localizado na frequência 193,325 THz (canal 10) têm-se ~ -62 dBm ($6,3 \times 10^{-10}$ W). O modelo usado na simulação não considera as perdas de inserção no dispositivo WDM-MUX (~ 6 dB) pelo que o nível de potência (P_{in} , por canal) efectivamente injectado na fibra é de $+3$ dBm. Após percorrerem os 100 km de fibra, os canais originais deverão ter um nível de potência no receptor de -22 dBm ($P_{rx} = P_{in} - \text{perdas}_{\text{fibra}} = +3 \text{ dBm} - 25 \text{ dB} = -22 \text{ dBm}$), assumindo uma variação linear das perdas na fibra, que é da mesma ordem de grandeza dos valores lidos na Figura 2-18.

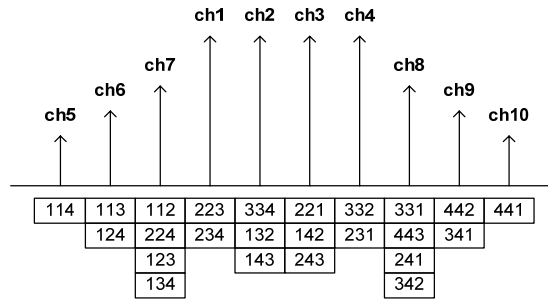


Figura 2-19: Alinhamento e combinação dos canais originais que originaram os produtos FWM relativamente ao espectro de frequências da Figura 2-18, com centro em 193,1 THz.

As combinações dos canais originais que originaram os 6 produtos FWM da janela óptica da Figura 2-18, podem ser obtidas com recurso à equação (2-20). Essas combinações são as ilustradas graficamente na Figura 2-19.

Usando agora a equação (2-23), isolando à esquerda o termo η_F , com $\gamma \approx 1,9 \text{ (W.km)}^{-1}$, e fazendo $d_F = 1$ (das combinações dos canais originais, 331 e 441, por exemplo, que originaram os produtos FWM identificados como canais 8 e 10, respectivamente), obtiveram-se valores de eficiência FWM de $\eta_{ch.8} = 6,3\%$ e $\eta_{ch.10} = 0,63\%$.

Os valores relativamente baixos de eficiência dos produtos FWM obtidos na simulação mostram, que a eficiência FWM, depende de factores diversos que concorrem entre si. Ou seja, para além do requisito da concordância de fase, que nesta situação é favorecida, dado os baixos valores da dispersão na fibra, entre 0,25 e -0,01 ps/nm.km (correspondentes à janela óptica compreendida entre 1554,2 e 1550,6 nm, onde se incluem os canais originais e os produtos FWM) e pelo espaçamento estreito entre canais, verifica-se que a linha de transmissão não é suficientemente longa, para que os sinais possam estar em fase tempo suficiente, para que da interacção entre eles resulte uma eficiência FWM mais elevada.

Relativamente ao canal 8, mantendo-se o mesmo nível de potência por canal (+3 dBm), uma eficiência FWM de 50 % é alcançada com um comprimento da linha de transmissão de 150 km. Voltaremos a este assunto com maior detalhe no capítulo 5, onde se avalia a eficiência FWM a partir de dados recolhidos na rede óptica em operação.

A Figura 2-20 mostra exemplos dos diagramas de olho, relativamente a alguns dos canais originais, onde se verifica a existência de diafonia, causada pelo efeito FWM e pela imperfeição do dispositivo WDM-DEMUX, de muito interferido (canal 2), a pouco interferido (canal 3).

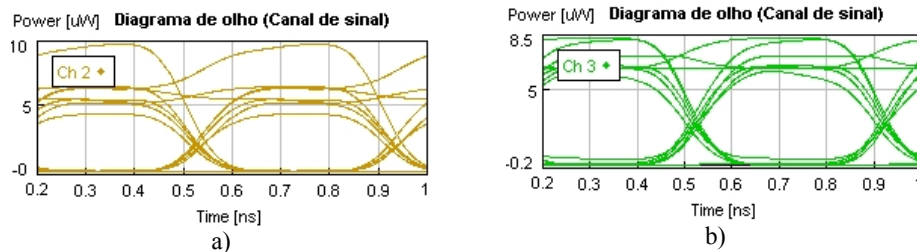


Figura 2-20: Representações de diagramas de olho dos canais originais: (a) 2 e (b) 3, após os sinais percorrem 100 km de fibra DSF.

Por sua vez, na Figura 2-21, representam-se os canais referidos anteriormente, após os sinais percorrerem apenas 2,5 km de fibra, mostrando ser negligenciável o efeito do dispositivo WDM_DEMUX, sendo igualmente visível não existirem vestígios de interferência devido ao efeito FWM ou a outro factor (linear ou não linear) limitativo à propagação dos sinais.

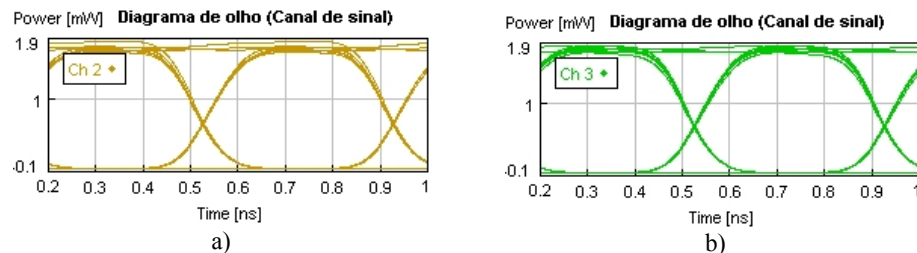


Figura 2-21: Diagramas de olho dos canais; (a) 2 e (b) 3, após os sinais percorrerem 2,5 km de fibra DSF.

2.3 Conclusões

Neste capítulo discutiram-se alguns aspectos relacionados com a propagação de impulsos na fibra óptica e identificaram-se alguns dos principais parâmetros que se relacionam com a propagação da luz em meios guiados.

Considerando os efeitos lineares e não lineares nas fibras ópticas realizaram-se algumas simulações com base nas especificações das recomendações da ITU-T com a intenção de verificar os limites das fibras SMF e DSF à propagação dos impulsos ópticos, tendo-se tirado algumas conclusões importantes particularmente quanto aos efeitos da FWM, a serem verificadas adiante no capítulo 6, onde se trata a problemática da optimização de uma rede óptica em operação.

Relativamente ao efeito da diafonia intercanal, caracterizaram-se os efeitos da diafonia dentro e fora da banda, tendo-se verificado ser mais penalizante à transmissão multicanal a primeira destas.

2.4 Referências

- [1] S. Ramo, J. R. Whinnery e T. Van Duzer, “Fields and waves in communications electronics”, 3ª Edição. John Wiley, Nova Iorque, 1994.
- [2] Gerd Keiser, “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill Higher Education, 3ª Edição, Nova Iorque, 2000.
- [3] J. E. Midwinter, “Optical fiber for transmission”, John Wiley, Nova Iorque, 1979.
- [4] S. E. Miller e A. G. Chynoweth, “Optical fiber telecommunications”, Academic Press, Nova Iorque, 1979.
- [5] T. Okoshi, “Optical fibers”, Academic Press, Orlando, 1982.
- [6] M. M. Ramsay, G. A. Hockham e K. C. Kao, “Propagation in optical fiber waveguides”, Electrical Communication, vol. 50, no. 3, pp. 162-169, 1975.
- [7] Gerd Keiser, “Optical fiber communications”, 1ª Edição, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1983.
- [8] John Senior, “Optical fiber communications: principles and practice”, Prentice-Hall. Londres, 1985.
- [9] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, 3ª Edição, John Wiley & Sons, Nova Iorque, 2002.
- [10] Rajappa Papannareddy, “Introduction to lightwave communication systems”, Artech House, Boston, 1997.
- [11] K. C. Kao e G. A. Hockham, “Dielectric-fibre surface waveguide for optical frequencies”, Proc. IEEE 113(7), pp. 1151-1158, 1966.
- [12] G. P. Agrawal, “Nonlinear Fiber Optic”, 2ª Edição, New York Academic, 1995.

- [13] A. Jones, "Historical Sketch of the Electrical Telegraph", Putman, Nova Iorque, 1852 em G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", John Wiley & Sons, Inc., New York (1992).
- [14] D. M. Rothnie, J. E. Midwinter, "Improved standard fibre performance by positioning the dispersion compensating fibre", *Electronic Letters*, vol. 32, nº 20, pp. 1907-1908, 1996.
- [15] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), "Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres", Rec. G.650, 1997.
- [16] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), "Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy", Rec. G.957, 1995.
- [17] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), "Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifier", Rec. G.692, 1998.
- [18] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), "Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable", Rec. G.653, 1997.
- [19] G. P. Agrawal and M. J. Potasek, "Nonlinear pulse distortion in single-mode optical fibers at the zero-dispersion wavelength", *Physics Review*, vol. A 33, pp. 1765-1776, 1986.
- [20] Colin Pask e Andrei Vatarescu, "Spectral approach to pulse propagation in a dispersive nonlinear medium", *Journal of the Optical Society of America, B: Optical Physics*, vol. 3, nº 7, pp.1018-1024, 1986.
- [21] D. Marcuse, A. R. Chraplyvy e R. W. Tkach, "Effect of fiber nonlinearity on long-distance transmission," *Journal of Lightwave Technol.*, vol. 9, nº 1, p. 121, 1991.
- [22] S. A .Planas, N. L. Mansur, H. L. Fragnito e C. H. Brito Cruz, "Spectral Narrowing in the Propagation of Chirped Pulses in Single-Mode Fibers", *Optical Letters*, vol. 18, nº 9, pp. 699-701, 1993.
- [23] D. Marcuse, "Single-channel operation in very long nonlinear fibers with optical amplifiers at zero dispersion", *Journal of Lightwave Technol.*, vol. 9, nº 3, p.356, 1991.
- [24] T.E. Stern and K. Bala, "Multiwavelength Optical Networks: a Layered Approach", Addison Wesley Longman, Inc, 1999.
- [25] P.N. Butcher e D. Cotter, "Elements of Nonlinear Optics", Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
- [26] Y. R. Shen, "Principles of Nonlinear Optics", John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, New York, 1984.
- [27] N. Kikuchi e S. Sasaki "Fibre nonlinearity in dispersion compensated conventional fibre transmission", *Electron Letters*, vol. 32, nº 6, pp. 570-572, 1996.
- [28] C. J. Koester and E. Snitzer, "Amplification in a fiber laser", *Appl. Opt.* vol. 3, pp. 1182-1186, 1964.
- [29] S. B. Poole, D. N. Payne, M. E. Fermann, "Fabrication of low loss optical fibers containing rare-earth ions" *Electronics Letters*, vol. 21, pp. 737-738, 1985.
- [30] R. J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D.N. Payne "Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m" *Electronics Letters*", vol. 23, p. 1026, 1987.
- [31] M. Nakazawa, Y. Kimura, E. Yoshida e K. Suzuki, "Efficient erbium-doped fibre amplifier pumped at 820 nm" *Electron. Letters*, vol. 26, pp. 1936-1937, 1990.
- [32] S. B. Poole, D. N. Payne, M. E. Fermann, "Fabrication of low loss optical fibers containing rare-earth ions" *Electronics Letters*, vol. 21, pp. 737-738, 1985.

- [33] K. Inoue, "Polarization effect on four-wave mixing efficiency in a single-mode fiber", IEEE J. Quantum Electron., vol. 28, pp. 883-894, 1992.
- [34] J. A. Armstrong, N. Bloembergen, J. Ducuing e P. S. Pershan, "Interactions among light waves in a nonlinear dielectric", Phys., Rev. 127, pp. 1918-1939, 1962.
- [35] T. J. Whitley, "A Review of Recent System Demonstrations Incorporating 1.3- μ m Praseodymium-Doped Fluoride Fiber Amplifiers", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 13, nº 5, pp.744-760, 1995.
- [36] M. Schubert e B. Wilhelmi, "Nonlinear Optics and Quantum Electronics", John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, 1986.
- [37] R. W. Boyd, "Nonlinear Optics", Academic Press, San Diego, CA, 1992.
- [38] F. Forghieri, R. W. Tkach e A. R. Chraplyvy, "Fiber Nonlinearities and their Impact on Transmission Systems", em I. P. Kaminov e T. L. Koch, edições Optical Fiber Telecommunications-III, vol. A, Academic, capítulo 8, pp. 196-26, Nova Iorque, 1997.
- [39] C. McIntosh, A. Yeniay, J. Toulouse e J. M. P. Delavraux, "Stimulated Brillouin scattering in dispersion-compensating fiber", Optical Fiber Technology, vol. 3, pp. 173-176, Abril, 1997.
- [40] D. A. Fishman e J. A. Nagel, "Degradations due to stimulated Brillouin scattering in multigigabit intensity-modulated fiber-optic systems", Journal of Lightwave Technol., vol. 11, pp. 173-176, Novembro, 1997.
- [41] X. P. Mao, R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, R. M. Jopson e R. M. Dorosier, "Stimulated Brillouin threshold dependence on fiber type and uniformity", IEEE Photonics Tech. Letters, vol. 4, pp. 66-69, Janeiro, 1992.
- [42] Andrew R. Chraplyvy, "Limitations on lightwave communications imposed by optical-fiber nonlinearities" J. Lightwave Technol., vol. 8, nº 10, p. 1548, 1990.
- [43] X. Y. Zou, M. I. Hayee, S. M. Hwang, e A. E. Willner, "Limitations in 10 Gb/s WDM optical-fiber transmission when using a variety of fiber types to manage dispersion and nonlinearities", Journal of Lightwave Technology, vol. 14, nº 6, pp. 1144-1152, Los Angeles, 1996.
- [44] R. J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D.N. Payne "Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m" Electronics Letters", vol. 23, p. 1026, 1987.
- [45] N. Kikuchi, K. Sekine e S. Sasaki "Analysis of XPM effect on WDM transmission performance", Electron Letters, vol. 33, pp. 653-654, 1997.
- [46] M. Shtaif, M. Eiselt, R. W. Tkach, R. H. Stolen e A. H. Gnauck, "Crosstalk in WDM systems caused by CPM en EDFAs", IEEE Photonics Tech. Letters, vol. 10, pp. 1796-1798, Dezembro, 1998.
- [47] P. S. André e J. L. Pinto, "Simultaneous measurement of the nonlinear refractive index and chromatic dispersion of optical fibers by four-wave mixing", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 34, nº4, pp. 305-307, 2002.
- [48] R. W. Trach, A. R. Chraplyvy, F. Forghieri, A. H. Gnauck e R. M. Derosier, "Four-photon mixing and high-speed WDM systems", Journal of Lightwave Technologies, vol. 13, pp. 841-849, 1995.
- [49] K. Inoue, "Four-wave mixing in a single-mode fiber in the zero dispersion wavelength region", Journal of Lightwave Technologies, vol. 10, pp. 1553-1560, 1992.

Capítulo 3

Elementos das redes ópticas

Este capítulo é dedicado ao estudo de alguns dos elementos constituintes das redes ópticas. Os elementos das redes ópticas que se abordam ao longo deste capítulo são; as interfaces ópticas do sistema SDH, os amplificadores ópticos e os elementos passivos das redes WDM, os quais são usados ao longo dos capítulos 4, 5 e 6.

Na primeira secção, apresentam-se as interfaces do sistema SDH, usadas no capítulo 5, no contexto da comparação dos valores medidos na rede óptica em operação com as especificações mais importantes das recomendações da ITU-T e, relevantes com a optimização da rede óptica a realizar no capítulo 6.

Na segunda secção procede-se a um estudo sucinto da amplificação óptica, a qual é usada no capítulo 6, na optimização da rede óptica em operação com base em sistemas monocanal.

A terceira secção é dedicada ao estudo dos elementos passivos constituintes de uma rede óptica baseada na tecnologia WDM. Estes dispositivos podem ser do tipo acopladores em fibra, filtros ópticos, ou dispositivos mais complexos com finalidade de (des)multiplexagem de sinais, como os OADMs (*Optical add/drop Multiplexers*). A abordagem aqui a realizar vem em linha com as considerações realizadas no capítulo anterior, particularmente quanto aos factores que limitam a transmissão e servirão de base a optimização da rede óptica, numa perspectiva multicanal, a ser realizada no capítulo 6.

3.1 Interfaces físicas do sistema SDH

A ITU-T definiu várias interfaces físicas para o sistema SDH (nomeadamente nas recomendações; G.957 ^[1], G.707 ^[2] e G.691 ^[3]) que se resumem na Tabela 3-1. As aplicações são classificadas em categorias de acordo com as distâncias a vencer. Estas distâncias são aproximadas e servem apenas o intuito de classificação e não para especificação de sistemas.

Aplicação		Distâncias máximas (km)	
Categoria	Código	1310 nm	1550nm
Intra-Office	I	< 2	
Short-haul Inter-office	S	15	40
Long-haul Inter-office	L	40	80
Very-Long-haul	V	60	120
Ultra-Long-haul	U	< 160	

Tabela 3-1: Caracterização das aplicações de acordo com as distâncias a vencer.

A classificação das interfaces ópticas tendo em consideração as ligações mais longas, que são as que nos interessa na perspectiva da optimização da rede óptica em operação, e para taxas de transmissão iguais ou superiores a 2,5 Gb/s podem ser observadas nas Tabela 3-2 em forma de resumo.

Ritmo de transmissão	Código da aplicação	Ritmo de transmissão	Código da aplicação
STM-16 (2,5 Gb/s)	L-16.2	STM-64 (10 Gb/s)	L-64.2
	L-16.3		L-64.3
	V-16.2		V-64.2
	V-16.3		V-64.3
	U-16.2	STM-256 (40 Gb/s)	L-256.2
	U-16.3		L-256.3

Tabela 3-2: Codificação das interfaces ópticas baseada no tipo e código de aplicação.

No código de aplicação, o primeiro dígito relaciona-se com as características das aplicações em termos das distâncias a vencer (*L*, de long-haul, por exemplo), o segundo dígito indica o nível hierárquico SDH e o último dígito relaciona o tipo de fibra com a janela de transmissão (3, indica o comprimento de onda nominal 1550 nm usando fibra G.653 [4] e 2, indica o mesmo comprimento de onda mas para fibras da norma G.652 [5]).

De seguida, nas Tabelas 3-4 e 3-5, mostram-se de forma resumida, os principais parâmetros relativamente ao emissor e ao receptor, para as redes ópticas constituídas por fibras das normas G.652 [5] e G.653 [4] da ITU-T, operando em 1550 nm. Por comodidade da análise apenas se apresentam os valores das aplicações acima de 2,5 Gb/s, as quais são usadas mais tarde no capítulo 6, onde se avaliam sistemas ópticos monocal com ritmos de transmissão até 40 Gb/s.

Começando pela Tabela 3-4, sumariam-se os principais parâmetros relativamente ao transmissor. Os valores indicados são relativos a um ponto de referência na fibra imediatamente a seguir ao conector óptico. Esse ponto de referência na fibra designa-se de “S” na recomendação G.957 [1] e “MPI-S” na recomendação G.691 [3] da ITU-T. Os emissores podem ser do tipo; LEDs ou Lasers de Fabry-Perot com modos longitudinais múltiplos (MLM) operando em 1310 nm, usados nas aplicações para distâncias mais curtas e a ritmos de transmissão mais baixos, e lasers

DFB de modo longitudinal único (SLM) a 1550 nm, para aplicações a maiores distâncias e ritmos de transmissão mais elevados. No caso de estudo uma vez que as aplicações são do tipo “L” ou “V”, os emissores do tipo MLM não são considerados.

Código da aplicação	Tipo de Emissor	Características espectrais da fonte			Potência da fonte [dBm]	
		Intervalo de operação, λ_s (nm)	Supressão modo lateral [dB]	Rácio extinção [dB]	Máx.	Min.
L-16.2	SLM	1500 - 1580	>30	8,2	+3	-2
L-16.3	SLM	1500 - 1580	>30	8,2	+3	-2
V-16.2	SLM	1530 - 1565	>30	8,2	+13	+10 ⁽²⁾
V-16.3	SLM	1530 - 1565	>30	8,2	+13	+10 ⁽²⁾
U-16.2	SLM	1530 - 1565	>30	>10	+15	+12 ⁽¹⁾
U-16.3	SLM	1530 - 1565	>30	>10	+15	+12 ⁽¹⁾
L-64.2 ⁽³⁾	SLM	1530 - 1565	>30	8,2 ^(b) 10 ^(a,c)	+13 ^(b) +2 ^(a,c)	+10 ^(b) -2 ^(a,c)
L-64.3	SLM	1530 - 1565	>30	8,2	+13	+10 ⁽²⁾
V-64.2 ⁽⁴⁾	SLM	1530 - 1565	>30	>10 ^(a) 8,2 ^(b)	+15 ^(b) +13 ^(a)	+12 ^(b) +10 ^(a)
V-64.3	SLM	1530 - 1565	>30	>10	+13	+10 ⁽²⁾
L-256 ⁽⁵⁾	SLM	1530 - 1565	≥ 30	11,9	+1,5 (valor médio)	
L-256 ⁽⁵⁾	SLM	1530 - 1565				
⁽¹⁾ Nestas aplicações usam-se Lasers do tipo DFB (CW) com modulação externa em combinação com amplificadores de elevada potência. Se a amplificação usada for do tipo standard os níveis de potência vão de +10 a +13 dBm.						
⁽²⁾ Neste tipo de aplicações usam-se Lasers do tipo DFB (CW) com modulação externa em combinação com amplificação do tipo standard.						
⁽³⁾ A rec. G.691 [3] da ITU-T, subdivide esta aplicação de acordo com a metodologia usada na compensação da dispersão: (a) compensação passiva (PDC), (b) SPM, (C) <i>pré-chirp</i> .						
⁽⁴⁾ A rec. G.691 [3] da ITU-T, subdivide esta aplicação de acordo com a metodologia usada na compensação da dispersão: (a) PDC, (b) combinação da SPM com PDC.						
⁽⁵⁾ Esta aplicação ainda não se encontra padronizada pela ITU-T. Os valores exibidos na Tabela servem unicamente o intuito de implementação das simulações.						

Tabela 3-3: Principais parâmetros especificados nas recs. G.957 [1], G.691 [3] e G.692 [6] da ITU-T relativamente ao transmissor.

Por último, na Tabela 3-5, sumarizam-se os principais parâmetros do receptor relativamente ao ponto de referência “R” ou “MPI-R” (conforme se trate da recomendação G.957 [1] ou G.691 [3] da ITU-T, respectivamente). Este ponto de referência na fibra localiza-se imediatamente antes do conector do receptor. Na tabela indicam-se; o intervalo de perdas (no percurso óptico entre os pontos “S”/ “MPI-S” e “R” / “MPI-R”), a sensibilidade do receptor, a potência máxima no receptor (*overload*) e os valores máximos de dispersão (cromática e PMD). Os receptores considerados são do tipo APD.

Código da aplicação	Perdas toleráveis [dB]	Menor Sensibilidade [dBm]	Pot. máx. no receptor [dBm]	Max. DGD [ps]	Dispersão [ps/nm]	
					Máx.	Min.
L-16.2	10-24	-28	-9	120	1600	1200
L-16.3	10-24	-27	-9	120	N/A	N/A
V-16.2	22-33	-25	-9	120	2400	N/A
V-16.3	22-33	-24	-9	120	400	N/A
U-16.2	33-44	-34	-18	120	3200	N/A
U-16.3	33-44	-33	-18	120	530	N/A
L-64.2 ⁽¹⁾	11-22 ^(a,c) 16-22 ^(b)	-14 ^(b) -26 ^(a,b)	-3 ^(b) -9 ^(a,b)	30	1600	-
L-64.3	16-22	-13	-3	30	260	N/A
V-64.2 ⁽²⁾	22-33	-23 ^(b) -25 ^(a)	-7 ^(b) -9 ^(a)	30	2400	-
V-64.3	22-33	-24	-9	30	400	N/A
L-256.2 ⁽³⁾	-	≤ -20,1	≥ 0	7,5 ⁽⁴⁾	-	-
L-256.2 ⁽³⁾					-	-
Assumindo um BER = 10 ⁻¹² em todas as aplicações.						
⁽¹⁾ A rec. G.691 [3] da ITU-T, subdivide esta aplicação de acordo com a metodologia usada na compensação da dispersão: (a) compensação passiva (PDC), (b) SPM, (C) pré-chirp.						
⁽²⁾ A rec. G.691 [3] da ITU-T, subdivide esta aplicação de acordo com a metodologia usada na compensação da dispersão: (a) PDC, (b) combinação da SPM com PDC.						
⁽³⁾ Esta aplicação ainda não se encontra padronizada pela ITU-T. Os valores exibidos na Tabela servem unicamente o intuito de implementação das simulações.						
⁽⁴⁾ Este valor foi determinado a partir da equação (2-17) com referência ao comprimento limite da aplicação (L ≤ 80).						

Tabela 3-4: Principais parâmetros especificados nas recs. G.957 [1], G.691 [3] e G.692 [6] da ITU-T relativamente ao receptor.

A Figura 3-1 mostra uma representação típica de uma ligação óptica conforme a recomendação G.957 [1] da ITU-T, evidenciando o tipo de interfaces de linha.

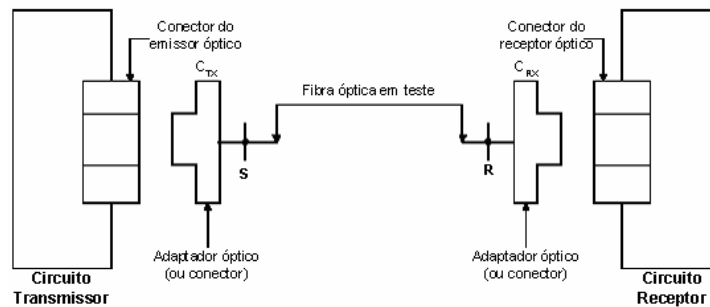


Figura 3-1: Representação de um sistema de interfaces de linha óptica [1].

Nas aplicações V e U (distâncias até 120 e 160 km, respectivamente, em 1550 nm), a recomendação G.692 [6] da ITU-T especifica que a amplificação óptica seja limitada a +17 dBm, de

forma a cumprir o requisito de protecção da vista. Este requisito, corresponde no caso das fibras da norma G.653 [4] da ITU-T, e usando lasers da classe 3A, a atingir-se a distância especificada na Tabela 3-1 (120 km.), numa configuração monocanal.

Nas ligações WDM, o requisito da protecção da vista, faz com que, conforme o número de canais cresça, o alcance máximo dos sistemas decresça, dado que a potência máxima permitida por canal permitida é diminuída. Usando o critério de +17 dBm como potência máxima (P_{\max}), a limitação da potência nominal por canal (P_{ch}) é conforme a recomendação G.692 [6] da ITU-T, expressa da seguinte forma:

$$P_{\text{ch}} = P_{\max} - 10 \log_{10}(N) = +17 \text{ dBm} - 10 \log_{10}(N) \quad (3-1)$$

onde N é o número de canais.

Muito embora a rede óptica em avaliação seja constituída maioritariamente por fibras de dispersão deslocada, as especificações das interfaces do sistema SDH suportadas em fibras da norma G.652 [5] da ITU-T são importante, no contexto de comparação do desempenho de ambas as redes.

Por exemplo, num pequeno exercício de dimensionamento de um percurso óptico, com base no nível hierárquico STM-16, para a aplicação V, com $L = 120$ km, pode ser avaliado qual dos dois tipos de fibra atrás referidos, melhor se adequa à transmissão monocanal, com base nos critérios; da atenuação e da dispersão, conforme os parâmetros da tabela resumo seguinte.

Código da Aplicação	Perdas [dB]	D [ps/nm]	P_{rx} [dBm]	P_{tx} [dBm]
V-16.2	22-33	2400	≥ -25	-2
V-16.3	22-33	400	≥ -24	-2
onde, P_{rx} , representa o valor da sensibilidade do receptor e P_{tx} , a potência mínima do emissor				

Tabela 3-5: Parâmetros usados na avaliação da aplicação V-16.x, usando fibras SMF e DSF.

Em termos de perdas no caminho óptico (A_{tol}) para as aplicações V-16.x, não levando em conta com qualquer margem de implementação, $A_{\text{tol}} = P_{\text{tx}} - P_{\text{rx}}$, assumindo que $\alpha = 0,25$ db/km, é o mesmo nos dois tipos de fibras e pelo critério do valor mínimo da potência óptica transmitida (-2 dBm), tem-se:

1) Para a fibra SMF, $A_{\text{tol, SMF}} = 23$ dB.

2) Nas mesmas condições, para a fibra DSF, $A_{\text{tol, DSF}} = 22$ dB.

que se enquadram dentro dos valores das perdas toleradas da aplicação (Tabelas 3-4 e 3-5).

Assumindo que a atenuação varia linearmente com a distância e, com base no critério das perdas, verifica-se que um sinal nessas condições pode percorrer 92 km na fibra SMF e 88 km na fibra DSF.

Fazendo um novo teste à rede, agora pelo critério da dispersão máxima (não usando compensação da dispersão), usando os valores anteriormente considerados em 2.2.1 ($D_{\text{SMF}} = 16 \text{ ps/nm.km}$ e $D_{\text{DSF}} = 1,7 \text{ ps/nm.km}$) e, tendo em consideração apenas este critério, obtém-se a seguinte autonomia (L , distância percorrida de fibra):

- 1) Para a fibra SMF, $L_{\text{SMF}} = 150 \text{ km}$.
- 2) Nas mesmas condições, para a fibra DSF, $L_{\text{DSF}} = 4000 \text{ km}$.

Da análise dos valores especificados na aplicação V-16.x e em linha com as considerações produzidas na secção 2.2.1, particularmente da observação da Figura 2-9, pode concluir-se que as redes ópticas constituídas por fibras SMF (quando não compensadas) são mais rapidamente limitadas pela dispersão que as constituídas por fibras DSF, as quais são mais limitadas pela atenuação.

3.2 Amplificação óptica

Nesta secção estuda-se de uma forma genérica e necessariamente sucinta a amplificação óptica que será extensivamente usada mais adiante no capítulo 6. Por se tratarem dos amplificadores ópticos mais usados nas redes ópticas actuais, referem-se nesta secção os do tipo: fibra dopada com Érbio (EDFA – *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) e semiconductor (SOA – *Semiconductor Optical Amplifier*). No fim da secção apresentam-se algumas das características mais importantes dos amplificadores ópticos, como sejam; o ganho de amplificação, a zona de saturação e formas de controlo do ganho.

Um EDFA consiste numa pequena secção de fibra, tipicamente com 10 m de comprimento [7,8], o qual é dopada com Érbio, adicionado à fibra na forma de iões (Er^{3+}). A Figura 3-2 exhibe esquematicamente este princípio.

Tal como mostra a Figura 3-2 um sinal de bombagem é misturado com o sinal de entrada, que se pretende amplificar, usando um acoplador com selectividade no comprimento de onda. O sinal de entrada e o da fonte de bombagem deverão possuir uma diferença significativa de comprimentos de onda, para que interferências entre os sinais não aconteçam.

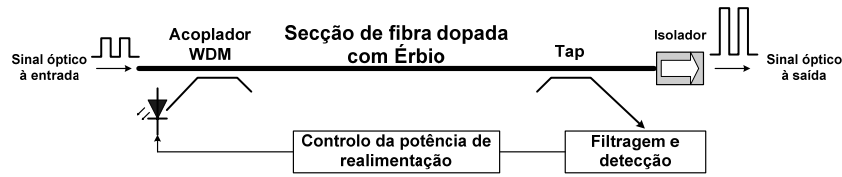


Figura 3-2: Princípio básico de funcionamento de um EDFA [7].

Os sinais multiplexados (no acoplador WDM), são depois guiados através do núcleo da secção de fibra dopada, onde o sinal da fonte de bombagem interage com os iões do Érbio, recebendo os fotões do sinal de entrada, parte da energia libertada pelos iões do Érbio. No entanto, isso não acontece para todos os comprimentos de onda do sinal de entrada. A amplificação do sinal de entrada é tipicamente limitada numa janela de comprimentos de onda que ronda os 24 nm, com centro em 1545 nm [7].

Por último na configuração de um EDFA é comum utilizar-se um isolador para prevenir reflexões que retornem da fibra acoplada.

Os EDFAs possuem várias características que os tornam atractivos relativamente a outras soluções tecnológicas. Entre as vantagens podem ser referidas as seguintes [7,9]: o seu custo relativamente baixo; operam praticamente com qualquer ritmo de transmissão; produzem um ganho do sinal óptico de cerca de 25 dB, podendo alguns amplificadores produzir ganhos de 50 dB ou mais; amplificam vários comprimentos de onda em simultâneo (com algumas limitações); o dispositivo é insensível à codificação, sem distorção significativa.

Por último referem-se algumas das limitações mais significativas [7,9] na operação dos EDFAs: introduzem ruído numa determinada quantidade que somada ao ruído vindo da rede, pode ser problemático numa ligação em cascata; a janela óptica de amplificação é usualmente de ~24 nm (cerca de 3 GHz, com centro em 1553 nm); o espectro do ganho não é uniforme para todos os comprimentos de onda; o dispositivo não recria os impulsos e não possui um mecanismo que compense a dispersão.

Os dois tipos mais comuns dos amplificadores semicondutores são os FPA (*Resonant Fabry-Perot Amplifier*) e, os TWA (*Traveling-Wave Amplifier*) [7,9]. Nestes dispositivos o sinal de entrada é acoplado através de um cordão óptico não terminado (na sua face anterior).

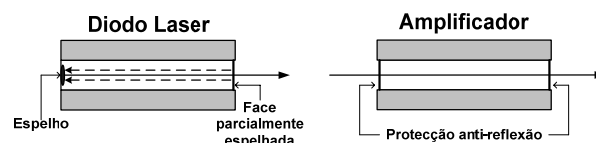


Figura 3-3: Comparação entre um diodo laser e um amplificador do tipo SOA [8].

Com um SOA do tipo FPA, dada a sua pequena dimensão, aproximadamente 450 μm , não é possível obter um ganho suficiente elevado numa simples passagem através do dispositivo. Uma solução adoptada para obter um ganho suficientemente elevado para uso comercial é usar faces reflectoras (espelhos) cujo princípio de funcionamento é em tudo semelhante a um diodo laser [7]. Tipicamente, um SOA pode possuir uma reflectividade de $\sim 30\%$. Dada esta funcionalidade, um SOA pode reflectir o sinal no interior da sua cavidade, algumas vezes, obtendo dessa forma a amplificação necessária.

No entanto, dado que o princípio da reflexão do sinal no interior de uma cavidade, é a forma de operação de uma laser, a situação é obviada, operando o SOA-FPA abaixo do patamar de *lasing* [7]. Ou seja, a um nível inferior de energia, para a qual a emissão estimulada predomine relativamente à emissão espontânea. Contudo, esta solução limita a capacidade de amplificação do dispositivo, por causa dos efeitos da saturação do ganho. Adicionalmente, a cavidade ressonante de Fabry-Perot constituinte do dispositivo, estreita a banda passante e torna a amplificação desigual nos canais WDM [7].

Um SOA do tipo TWA possui características físicas algo diferentes de um FPA. A cavidade é aumentada (tipicamente para o dobro ou o triplo) para acomodar espaço suficiente para o ganho de amplificação, dado neste dispositivo a amplificação ser de simples passagem, não possuindo características ressonantes como um laser. O comprimento da cavidade pode ser tão grande como 2 mm [7].

Dado não possuir um mecanismo de realimentação, o dispositivo pode operar acima do patamar de *lasing*, conferindo-lhe maior ganho por unidade de comprimento, que um SOA-FPA. Um TWA pode disponibilizar um ganho de sinal até 25 dB numa largura de banda aproximadamente igual a 40 nm [7].

Uma limitação importante nestes dispositivos, é a de não disponibilizarem potências de saída elevadas (apenas alguns miliwatts), o que é normalmente suficiente em sistemas monocal, mas pode contudo ser insuficiente em sistemas WDM.

Outras limitações do dispositivo são; a de tenderem a serem ruidosos, serem sensíveis à polarização e produzirem diafonia severa quando amplificam canais múltiplos. Esta última característica torna este tipo de SOAs pouco hábil como amplificador em sistemas multicanal, permitindo-lhes contudo funcionar como comutadores de comprimentos de onda e como portas lógicas nas redes ópticas.

Algumas das características que tornam interessante a utilização dos SOAs é o de operarem indistintamente na segunda e terceira janelas ópticas, poderem ser facilmente integrados no mesmo

substrato de outros dispositivos ou circuitos ópticos (por exemplo, acopladores e isoladores ópticos, ou nos circuitos do receptor) e comparativamente com os EDFAs consumirem menos energia, terem menos componentes e serem mais compactos [7]. Estes dispositivos têm uma resposta mais rápida ao ganho na ordem de 1 a 0,1 ps [7].

Um dos parâmetros mais importantes de um amplificador é o ganho de sinal ou ganho de amplificação, G , o qual é definido por [7]:

$$G = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \quad (3-2)$$

onde $P_{s,in}$ e $P_{s,out}$ são, respectivamente, a potência de entrada e de saída do sinal a amplificar.

O ganho de simples passagem no meio activo de um SOA-TWA é [7]:

$$G = \exp[\Gamma(g_m - \bar{\alpha})L] \equiv \exp[g(z)L] \quad (3-3)$$

onde Γ é o factor de confinamento da cavidade, g_m representa o coeficiente de ganho do material, $\bar{\alpha}$ é o coeficiente efectivo de absorção do material no caminho óptico, L é o comprimento do dispositivo e $g(z)$ representa o ganho do amplificador por unidade de comprimento.

A equação (3-3) mostra que o ganho de amplificação aumenta com o comprimento do dispositivo. No entanto, o ganho interno é limitado pela saturação [8,10]. Esta situação ocorre devido a que a densidade dos portadores na região do ganho de um amplificador depende da intensidade do sinal à entrada.

No caso de um EDFA, o ganho pelo princípio de conversão da energia, é [7,9]:

$$G \leq 1 + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \frac{P_{p,in}}{P_{s,in}} \quad (3-4)$$

onde $P_{p,in}$ e $P_{s,in}$ são a potência de bombagem e do sinal de entrada, respectivamente, e λ_p e λ_s são o comprimento de onda de bombagem e do sinal de entrada, respectivamente. Assumindo não existir emissão espontânea.

A equação (3-4) mostra uma relação importante entre a potência do sinal de entrada e o ganho. Quando a potência do sinal à entrada do dispositivo é muito elevada, tal que $P_{s,in} \gg (\lambda_p/\lambda_s)P_{p,in}$, então o ganho máximo do amplificador é unitário.

A Figura 3-4 caracteriza a dependência do ganho de amplificação relativamente ao sinal de entrada, onde o ganho de sinal-zero (ou ganho para sinais fracos) é $G_0 = 30$ dB. A curva evidencia que conforme a potência do sinal de entrada vai crescendo, o ganho inicialmente permanece no ponto do ganho de sinais fracos para depois começar a decrescer. Este decrescimento é linear na

região do ganho de saturação, e aproxima-se de um valor assintótico de 0 dB (ganho unitário), para sinais de entrada de potências elevadas. O ponto $P_{\text{out,sat}}$ (ponto de saturação da potência de saída) é o ponto para o qual o ganho de amplificação é reduzido 3 dB.

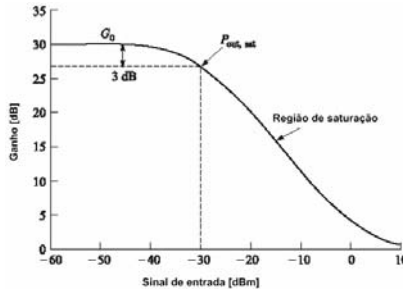


Figura 3-4: Dependência típica do ganho de simples passagem na potência de um sinal óptico de entrada para um ganho de sinais fracos com $G_0 = 30$ dB [7].

Uma forma prática de manter a potência de saída constante é operar o amplificador óptico na região do ganho de compressão (saturação), como mostra a Figura 3-5 [11]. Nesse método, designado de controlo automático do ganho (AGC – *Automatic gain control*) quando a potência do sinal de entrada decresce, o ganho de amplificação aumenta, de forma a fornecer um sinal à saída de potência mais elevada. Contrariamente, se o sinal de entrada for já muito elevado, o ganho decresce para compensar essa variação. A partir do ponto de operação (nível G_1), um decréscimo na potência de entrada faz com que o ganho suba até ao nível G_2 . De modo análogo se a potência de entrada subir o ganho baixa até atingir o nível G_3 .



Figura 3-5: Método passivo para controlo do ganho no qual o amplificador funciona na região de saturação com um nível de sinal nominal de entrada, $P_{s,in}^{nom}$ [2].

A quantidade certa de compensação no ganho de amplificação depende da relação entre o ganho e a potência óptica de saída (dada pela inclinação da curva na região de saturação). Uma limitação ao método AGC é o ganho ser relativamente baixo, dado o amplificador trabalhar na região de saturação. Uma alternativa é usar o método do controlo dinâmico do ganho (DGC –

Dynamic gain control) no qual a potência de saída é mantida constante em função do comprimento de onda.

3.3 Elementos passivos das redes WDM

Devido a implementação de sistemas (D)WDM uma organização mais eficiente do espectro foi necessária, em termos de bandas utilizáveis pelas diversas aplicações/serviços. Na Tabela 3-6 agrupam-se estas bandas de comprimentos de onda [7].

Banda	Designação	$\Delta\lambda$ (nm)
O	Original	1260 a 1360
E	Extended	1360 a 1460
S	Short	1460 a 1530
C	Conventional	1530 a 1565
L	Long	1565 a 1625
U	Ultra-long	1625 a 1675

Tabela 3-6: Organização das bandas de comprimentos de onda.

A recomendação G.692 [6] da ITU-T especifica uma grelha de frequências ancoradas na frequência óptica dos 193,1 THz (1552,524 nm) e com separações de canais de 100 GHz (0,8 nm em 1552 nm). São sugeridos espaçamentos de 50 GHz (0,4nm) para o DWDM e de 200 GHz (1,6nm) para sistemas com requisitos mais relaxados.

Um aspecto de fundamental importância no sistema WDM é o dos comprimentos de onda discretos formarem um conjunto ortogonal de portadoras ópticas, as quais podem ser separadas, encaminhadas e comutadas sem interferirem grandemente (a menos da referida diafonia linear e não linear) umas com as outras [7]. Essa situação leva a que os níveis de intensidade das portadoras ópticas tenham de ser mantidos dentro de certos limites para prevenir os efeitos não lineares das fibras, nomeadamente o efeito FWM, os quais degradam as condições de operação dos sistemas de comunicação ópticos, como referido na secção da 2.2.2.4.

Os elementos passivos operam no domínio óptico e de uma forma combinada, permitem a repartição e a difusão dos sinais dentro da rede. Neste capítulo abordam-se ainda outro tipo de dispositivos fundamentais nas redes WDM, como sejam os filtros, multiplexers WDM, multiplexers do tipo adição/subtracção (OADMs).

Os componentes passivos podem ser fabricados com fibras ópticas ou em guias de onda planares construídos por materiais fotorefractivos como o Niobato de Lítio (LiNbO_3) e o Fosfato de Índio (InP) [12-14].

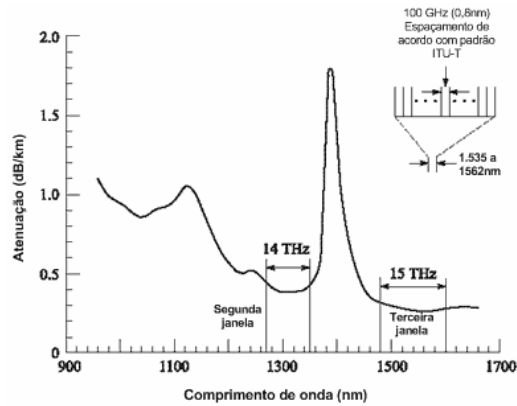


Figura 3-6: Grelha de comprimentos de onda corresponde a banda C (convencional) [7].

3.3.1 Acopladores ópticos

Um componente óptico que faça a distribuição de sinais no interior de uma rede designa-se de acoplador óptico. Este dispositivo é por definição, um componente de rede que permite a distribuição da potência de um determinado sinal de uma fibra para duas ou mais fibras, ou inversamente, combinar o sinal entre duas ou mais fibras de entrada numa única fibra de saída do dispositivo.

Este dispositivo óptico provoca uma atenuação muito maior que um simples conector ou junta porque o sinal de entrada é na realidade dividido entre os diversos portos. Por exemplo, num repartidor óptico 1 x 2, em cada saída o nível do sinal é menor que metade da potência de entrada, uma vez que existe o efeito combinado da divisão da potência (perdas de 3 dB) mais as perdas intrínsecas ao próprio processo de acoplamento [18-20]. Os acopladores ópticos podem ser do tipo; repartidor, combinador, acoplador em X e, acopladores em estrela e em árvore.

A Figura 3-7 mostra um **acoplador bicónico de fibra fundida** (ou simplesmente, acoplador direccional 2 x 2 [15-17]).

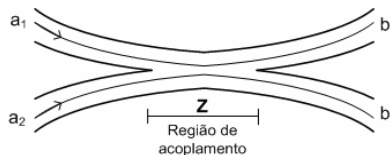


Figura 3-7: Acoplador bicónico de fibra fundida.

Neste tipo de acoplador dado que o afunilamento de cada uma das fibras em direcção à região de acoplamento (Z) é gradual, apenas uma fracção muito pequena da energia é reflectida para qualquer uma das entradas (a_1 e a_2).

Um aspecto importante nas características deste dispositivo é que embora num acoplador de 3 dB ambas saídas tenham a mesma amplitude, elas estão desfasadas de $\pi/2$. Esta desfasagem assume um papel importante em certos dispositivos que usam este tipo de acopladores.

Um **acoplador do tipo estrela**, tem como função principal, nas redes ópticas, combinar a potência das N portas de entrada e dividi-la pelas M portas de saída do dispositivo.

O dispositivo pode ser implementado usando acopladores bicónicos fundidos cuja técnica tem sido amplamente experimentada e desenvolvida, como é referido na literatura [17,18,21]. Contudo o fabrico em larga escala deste tipo de dispositivos é limitada pela dificuldade em controlar o acoplamento, durante o processo de fusão e estiramento das fibras.

Num acoplador estrela ideal, a potência óptica de qualquer das entradas é dividida uniformemente por todas as portas de saída. As perdas totais no dispositivo incluem as perdas na repartição (divisão) do sinal e as perdas suplementares no caminho do sinal através do acoplador. Estas perdas são dadas por, respectivamente [7]:

$$\text{Perdas por divisão} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{N} \right) = 10 \log_{10} N \quad (3-5)$$

$$\text{Perdas suplementares} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{in}}}{\sum_{i=1}^N P_{\text{out},i}} \right) \quad (3-6)$$

Alternativamente, um acoplador estrela pode ser construído usando uma cascata de acopladores (2×2). Para garantir uma transferência de energia mais uniforme na sua malha interna, estes acopladores devem ser de 3 dB. O número de acopladores de 3 dB necessários para construir um acoplador estrela $N \times N$ é [7]:

$$N_c = \frac{N}{2} \log_2 N = \frac{N}{2} \frac{\log_{10} N}{\log_{10} 2} \quad (3-7)$$

Usando a mesma linha de análise usada anteriormente, se a potência que atravessa cada acoplador de 3 dB for F_T (uma fracção da potência total, com $0 \leq F_T \leq 1$), uma parte dessa fracção da potência ($1 - F_T$), que atravessa cada elemento (2×2), perde-se. Essas perdas (suplementares) no acoplador são [7]:

$$\text{Perdas suplementares} = -10 \log_{10} \left(F_T^{\log_2 N} \right) \quad (3-8)$$

Sendo as perdas de repartição do sinal dadas pela equação (3-5), as perdas totais que um sinal experimenta ao atravessar as $\log_2 N$ etapas do acoplador $N \times N$, e ao ser repartido nas N portas de saída do acoplador, são [7]:

$$\text{Perdas totais} = -10 \log_{10} \left(\frac{F_T^{\log_2 N}}{N} \right) \quad (3-9)$$

que incluem as perdas por divisão do sinal e as perdas suplementares. Isto mostra que as perdas crescem exponencialmente com N .

No caso de um acoplador estrela do tipo 16×16 , assumindo que a fracção de potência que se perde em cada elemento (2×2) é de 1%, o que implica $F_T = 0,99$, então, nesta situação, as perdas totais são de 12,2 dB.

3.3.2 Multiplexadores WDM

Estes dispositivos ópticos são componentes essenciais na implementação das redes WDM. De uma forma similar ao que acontece com os filtros ópticos, os multiplexadores WDM requerem mecanismos de selectividade no comprimento de onda e podem ser classificados em duas categorias [30-34]:

- **Baseados na difracção.** Usam um dispositivo dispersivo angular, tal como uma rede de difracção, como seja o caso das redes de Bragg, cuja função é a de dispersar espacialmente a luz incidente em vários comprimentos de onda.
- **Baseados na interferência.** Estes dispositivos usam filtros ópticos e acopladores direccionais. Estão nesta situação os interferómetros Mach-Zehnder (MZIs) que quando agrupados podem formar este tipo de dispositivos.

Um **Multiplexador-MZI** pode ser construído ligando as duas portas de saída de um acoplador de 3 dB às duas portas de entrada de um outro acoplador igual. O primeiro acoplador divide o sinal de entrada em duas partes iguais, as quais sofrem diferentes desvios de fase, antes de interagirem no segundo acoplador.

A Figura 3-8 mostra uma cadeia de MZIs para formar um dispositivo multiplexador. O dispositivo pode igualmente ser usado como desmultiplexador [22,23,24,26], se os comprimentos de onda multiplexados forem introduzidos no terminal da direita. Esta propriedade deve-se a reciprocidade das ondas ópticas em meios dieléctricos [7,23-25]. Na figura, MZ_x representa cada um dos MZIs usados no multiplexador.

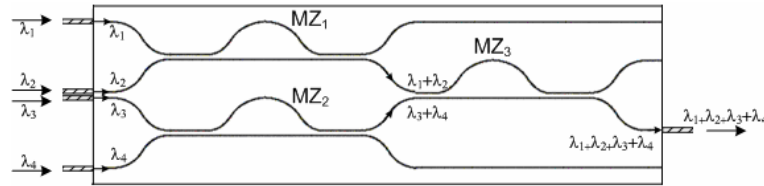


Figura 3-8: Multiplexador de quatro canais baseado no MZI.

Um **multiplexador baseado em redes de guias de onda organizados** (AWG - *Arrayed Waveguide Grating*) é um dispositivo extremamente versátil podendo ser usado como (des)multiplexador, elemento para adicionar ou subtrair canais e um encaminhador de comprimentos de onda [27-29]. Este dispositivo é uma generalização do interferómetro de Mach-Zehnder. Enquanto que no MZI são adicionadas duas cópias do mesmo sinal, com fases diferentes, no AWG são adicionadas várias cópias do mesmo sinal, com fases diferentes.

Na sua configuração típica o AWG tem M guias de onda de entrada e de saída e dois dispositivos de focagem idênticos, constituídos por acopladores planares ligados entre si por N guias de ondas livres, com constante de propagação, β .

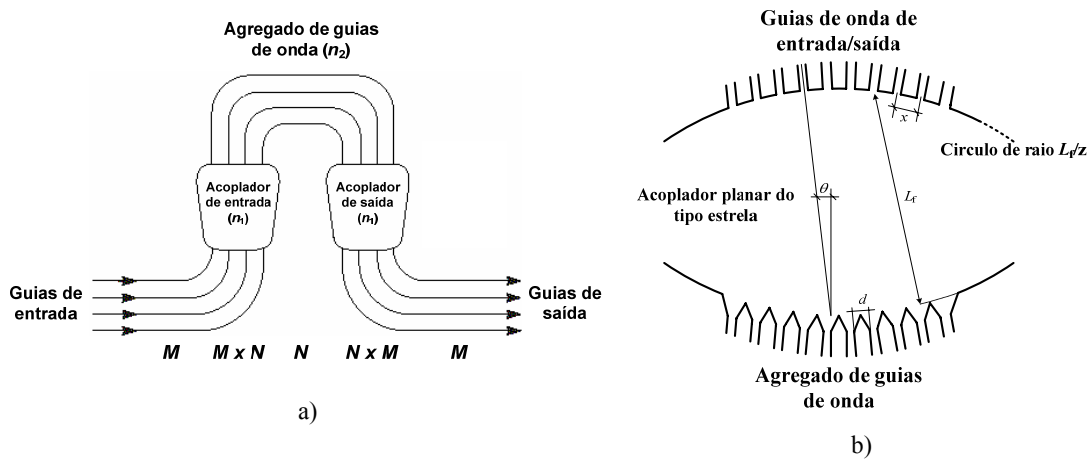


Figura 3-9: Exemplo de um AWG utilizado como dispositivo WDM; em a) diagrama de blocos e em b) geometria de um acoplador estrela.

O comprimento de guias de ondas adjacentes na região central diferem entre si por um valor constante, ΔL , formando uma rede do tipo Mach-Zehnder, como mostra a Figura 3-9b). O acoplador de entrada reparte o sinal de cada guia de entrada em M partes. As fases relativas de cada uma das M partes são determinadas pelas distâncias viajadas no acoplador. De modo semelhante o acoplador de saída também impõe diferenças de fase entre cada guia organizado e os guias de saída.

Dado que dois guias organizados adjacentes têm a mesma diferença de comprimento, ΔL , resulta daí uma diferença de fase que é, $2\pi n_2 \Delta L / \lambda$, onde n_2 é o índice de refração do agregado de guias de onda (da Figura 3-9a)). Da condição de concordância de fase, o sinal emitido num guia de onda deverá satisfazer a relação [7]:

$$n_1 d \sin \theta + n_2 \Delta L = m\lambda \quad (3-10)$$

onde d é o espaçamento entre guias de onda adjacentes, n_1 é o índice de refração do acoplador, θ , é o ângulo de difracção à entrada ou à saída do acoplador, m (um inteiro) representa a ordem de difracção da rede e λ é o comprimento de onda de trabalho.

A equação (3-10) mostra que a guiagem em fase é periódica para cada caminho no interior do dispositivo. Dado que o dispositivo funciona com um sistema de lentes com determinado comprimento de focagem, o sinal terá a mesma imagem, em cada mudança de 2π no ângulo, θ , entre um par de guias adjacentes. O período entre dois máximos consecutivos do sinal, no domínio da frequência, é conhecido como largura espectral livre (FSR - *Free spectral range*) dada por [7,9]:

$$\text{FSR} = \frac{c}{n_g (\Delta L + d \sin \theta_i + d \sin \theta_o)} \quad (3-11)$$

onde $\theta_i = \theta_o$ representam os ângulos de difracção à entrada e saída dos guias de ondas, respectivamente, e n_g é o índice de refração de grupo nos guias. Com $\theta_i = \theta_o = 0$ tem-se

$$\text{FSR} = \frac{c}{(n_g \Delta L)}, \text{ que corresponde à situação das portas de entrada e de saída do dispositivo estarem}$$

alinhadas. Esta última relação mostra que a FSR depende da combinação das portas de entrada e de saída do dispositivo.

No desenho do dispositivo fazendo ΔL maior, o espaçamento entre canais WDM pode ser estreitado, ou seja, o dispositivo pode (des)multiplexar sinais com espaçamentos mais pequenos de comprimentos de onda.

Os **multiplexadores do tipo adição/subtracção** (OADM – *Optical add-drop multiplexer*), [7,9,30-34] são dispositivos usados nas redes WDM quando se pretende retirar ou adicionar um ou mais canais, preservando simultaneamente todos os outros. Estes dispositivos podem ser do tipo paralelo ou série.

No OADM paralelo todos os comprimentos de onda são separados e recombinados. Pode ser subtraído um número arbitrário de canais WDM, sendo os restantes passados directamente. Esta arquitectura não impõe grandes restrições no planeamento dos caminhos ópticos, pois uma variação

futura no número de canais subtraídos por nó não afecta os canais existentes. A Figura 3-10 ilustra com um exemplo, o OADM do tipo paralelo.

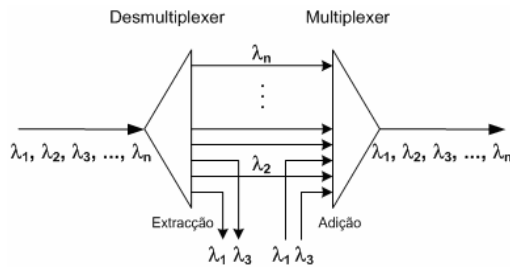


Figura 3-10: Exemplo de um OADM: os comprimentos de onda λ_1 e λ_3 são extraídos e de novo adicionados. Os restantes comprimentos de onda passam.

As perdas num OADM são fixas, independentemente do número de canais subtraídos e/ou adicionados. A principal desvantagem desta técnica é não ser eficiente em termos de custos, pois será sempre necessário suportar os custos de (des)multiplexagem de um grande número de canais, mesmo quando apenas se necessita de subtrair/adicionar um pequeno número. Por outro lado, como todos os canais são (des)multiplexados em todos os AODMs, o sinal pode atravessar muitos filtros (constituintes dos dispositivos) antes de chegar ao destino, o que implica uma tolerância muito apertada ao nível do comprimento de onda dos (des)multiplexadores e lasers.

Uma variante deste tipo de AODM é o paralelo por bandas onde as operações de (des)multiplexagem são efectuadas em duas etapas. Na primeira destas, os canais são separados por bandas, na segunda etapa as bandas são separadas nos seus canais individuais, tal como se exemplifica na Figura 3-11.

Relativamente à eficiência de custos, nesta configuração o processo de (des)multiplexagem é mais eficaz que no OADM paralelo. A utilização de bandas permite a passagem directa de canais pelo que as perdas são menores e mais uniformes, sendo possível acomodar mais facilmente o aumento de número de canais, pelo que este tipo de OADM tende naturalmente a ser uma melhor escolha.

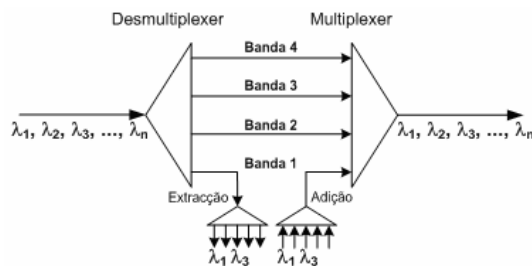


Figura 3-11: Exemplo de uma OADM: apenas uma das bandas é sujeita a extracção e adição de canais.

Uma outra configuração diferente de OADM é o tipo série onde os comprimentos de onda são separados e recombinados um de cada vez. Para se subtrair ou adicionar mais do que um canal, terão de ser utilizados vários OADMs deste tipo. Na Figura 3-12 esquematiza-se a operação, onde apenas os comprimentos de onda λ_1 e λ_3 são extraídos e de novo adicionados.

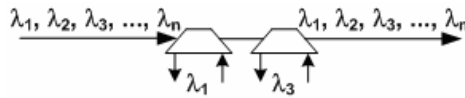


Figura 3-12: Exemplo da operação de adição e de subtração num OADM do tipo série.

Esta arquitectura tem a grande vantagem de ser largamente modular, e portanto de custo proporcional ao número de canais a subtrair. Os canais de passagem não são sujeitos a qualquer filtragem. Cada percurso óptico atravessa apenas dois filtros: um no nó emissor e outro no nó receptor. Nesta situação as tolerâncias dos diversos dispositivos assinalados anteriormente no caso do OADM paralelo não terão de ser tão apertadas.

A desvantagem principal desta configuração é a da adição e subtração de canais ter um impacto muito negativo nos canais existentes o que implica um grande rigor no planeamento do número de canais a adicionar/subtrair em cada nó da rede, para minimizar perturbações futuras.

A arquitectura não é muito eficaz ao nível dos custos. Estes aumentam significativamente se o número de canais a subtrair for elevado, visto ser necessária uma cascata de OADMs. Pela mesma razão, as perdas aumentam proporcionalmente se o número de canais a adicionar for elevado. A situação pode exigir no limite, a utilização de amplificadores adicionais, o que também se traduz num impacto negativo ao nível dos custos.

Uma configuração alternativa aos OADMs série é a configuração por bandas, onde os comprimentos de onda são separados e recombinados por bandas, sendo subtraída/adicionada uma banda por OADM. Esta técnica pode ser vista como um compromisso entre as arquitecturas série e paralelo. Neste tipo de OADM a adição/subtração de canais adicionais pertencentes à banda de cada OADM, não afecta os caminhos ópticos da rede, visto que as perdas de passagem de todos os outros canais não pertencentes ao grupo adicionado/subtraído são fixas.

Este dispositivo tem como desvantagem principal o facto de sendo necessário que um dado comprimento de onda seja adicionado num nó e subtraído noutro, obrigar a que todos os comprimentos de onda desse grupo sejam sujeitos a essa mesma operação. Por outro lado, ao remover-se um comprimento de onda num dado nó e este tenha de ser regenerado antes de ser de novo adicionado na rede, o mais provável é que todos os comprimentos desse grupo também necessitem de o ser, mesmo tratando-se de canais de passagem. Essa situação deve-se ao facto de

ser difícil gerir a dispersão e o balanço de potências da ligação para ter em conta os canais de passagem, sem introduzir a regeneração dos mesmos.

3.4 Conclusões

No início deste capítulo apresentaram-se as interfaces físicas do sistema SDH, relevantes com o estudo a ser realizado no capítulo 6, e realizou-se um pequeno exercício de dimensionamento, onde se compararam os desempenhos das fibras padrão e de dispersão deslocada, relativamente à aplicação V-16.2(3), com base nos critérios da atenuação e da dispersão.

Ainda neste capítulo, estudaram-se de uma forma genérica os amplificadores ópticos do tipo; EDFA e SOA, e alguns parâmetros importantes da amplificação óptica. A amplificação óptica é usada no capítulo 6, no estudo dos sistemas monocal a 10 e 40 Gb/s.

Ao longo deste capítulo estudaram-se ainda alguns dos elementos passivos das redes WDM. Estes elementos passivos são igualmente usados em diversas configurações e equipamentos de medida, nomeadamente; os interferómetros, circuladores, acopladores e filtros, pelo que é importante conhecer o seu funcionamento interno e a forma como se estabelecem as diversas interligações entre estes, como forma de prever o comportamento dos sinais quando os atravessam.

Por último, o estudo mais desenvolvido de alguns dos dispositivos das redes WDM, permitirá no futuro, ter uma ideia mais clara quanto a viabilidade de soluções de implementação, pesando factores técnicos, nomeadamente quanto ao fenómeno da diafonia, e aos económicos, os quais se constituem numa condicionante muito importante na implementação dos sistemas de comunicação ópticos.

3.5 Referências

- [1] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy”, Rec. G.957, 1995.
- [2] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Network node interface for the synchronous digital hierarchy”, Rec. G.707, 2000.
- [3] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 systems and other systems with optical amplifiers”, Rec. G.691, 2000.
- [4] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable”, Rec. G.653, 1997.
- [5] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of a single-mode optical fibre cable”, Rec. G.652, 2000.

- [6] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical Interfaces for Multichannel Systems with Optical Amplifiers”, Rec. G.692, 1997.
- [7] Gerd Keiser, “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill Higher Education, 3ª Edição, Nova Iorque, 2000.
- [8] R. Giles e T. T. Li, “Optical Amplifiers transform long-distance lightwave telecommunications”, IEEE Proc., vol. 84, pp. 870-883, 1996.
- [9] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, 3ª Edição, John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, 2002.
- [10] M. J. O’Mahoney, “Semiconductor laser optical amplifier for use in future fiber systems”, Journal of Lightwave Technology, vol. 6, pp. 531-544, 1988.
- [11] Rajappa Papannareddy, “Introduction to lightwave communication systems”, Artech House, Boston, 1997.
- [12] A. Takagi, K. Jinguji e M. Kawachi, “Wavelength characteristics of 2 x 2 optical channel-type directional couplers with symmetric or nonsymmetric coupling structures”, Journal of Lightwave Technology, vol. 10, pp. 735-746, 1992.
- [13] R. G. Hunsperger, “Integrated Optics: Theory and Technology”, 4ª Edição, Springer Verlag, Heidelberg, 1995.
- [14] A. Yariv, “Optical Electronics”, Sounders College Publ., 4ª Edição, Orlando, 1991.
- [15] A. W. Snyder e D. L. Love, “Optical Wavelength Theory”, Chapman & Hall, Nova Iorque, 1983.
- [16] A. Ankiewicz, A. W. Snyder e X. H. Zheng, “Coupling between parallel optical fiber cores – Critical examination”, Journal of Lightwave Technology, vol. 4, pp. 1317-1323, 1986.
- [17] M. Eisenmann e E. Weidel, “Single-mode fused biconical couplers for WDM with channel spacing between 100 and 300 nm”, Journal of Lightwave Technology, vol. 6, pp. 113-119, 1988.
- [18] J. W. Arkwright e D. B. Mortimore, “7 x 7 monolithic single-mode star coupler”, IEE Electronics Letters, vol. 26, nº 1, pp. 1534-1535, 1990.
- [19] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson e B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, Physics Letters, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [20] J. C. C. Carvalho, L. C. W. A. Costa, M. J. Sousa, C. S. Sales Jr., e C. R. L. Francês, “Optimização de redes de Bragg em fibra usando algoritmos genéticos”, Journal of Microwaves and Optoelectronics, vol. 4, nº 2, pp. 136-151, 2005
- [21] S. Srivastava, N. Gupta, M. Saini e E. K. Sharma, “Power exchange in coupled optical waveguides”, Journal of Optical Communication”, vol. 18, nº 1, pp. 5-9, 1997.
- [22] C. R. Giles, “Lightwave applications of fiber Bragg gratings”, Journal of Lightwave Technology, vol. 15, pp. 1391-1404, 1997.
- [23] B. H. Verbeek, C. H. Henry, N. A. Olsson, K. J. Orlowsky, R. F. Kazarinov e B. H. Johnson, “Integrated four-channel Mach-Zehnder multi/demultiplexer fabricated with phosphorous doped SiO₂ waveguides on Si”, Journal of Lightwave Technology, vol. 6, pp. 1011-1015, 1988.
- [24] N. Takato et. Al., “Silica-based integrated optic Mach-Zehnder multi/demultiplexer family with channel spacing of 0,01-250 nm”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 8, pp. 1120-1127, 1990.

- [25] M. M. K. Liu, “Principles and Applications of Optical Communications”, Irving, Chicago, 1996.
- [26] K. Oda, N. Tokato, T. Kominato e H. Toba, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 1, p.137, 1989.
- [27] H. Takahashi, K. Oda, H. Toba e Y. Inoue, “Transmission characteristics of arrayed waveguide N x N wavelength multiplexers”, Journal of Lightwave Technology, vol. 13, pp. 447-455, 1995.
- [28] L. H. Spiekman, M. R. Amersfoort, A. H. de Vreede, F. P. G. M. van Ham, A. Kuntze, J. W. Pedersen, P. Demeester e M. K. Smit, “Design and realization of polarization independent phased array wavelength demultiplexers”, Journal of Lightwave Technology, vol. 14, pp. 991-995, 1996.
- [29] W. Lin, H. Li, Y. J. Chen, M. Dagenais e D. Stone, “Dual-channel-spacing phased-array waveguide grating multi/demultiplexing”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 8, pp. 1501-1503, 1989.
- [30] R. Ramaswami e K.N. Sivaraja, “Optical Networks: A Practical Perspective”, 2ª edição, Morgan Kaufmann Publishers, São Francisco, 2002.
- [31] P. E. Green Jr., “Fiber-optical Networks”, Prentice Hall, Nova Jersey, 1993.
- [32] D. W. Smith, “Optical Network Technology”, Chapman & Hall, Nova Iorque, 1995.
- [33] H. A. Haus, “Waves and Fields in Optoelectronics”, Prentice Hall, Nova Iorque, 1984.
- [34] Gerd Keiser, “A review of WDM technology and applications”, Optical Fiber Technology, vol. 5, pp. 3-9, 1999.

Capítulo 4

Técnicas de medida: teste e validação

De uma forma geral, a avaliação constante da qualidade de uma rede óptica é muito mais que planejar, comissionar, colocar em serviço (aceitação) e reparar sempre que necessário. A qualidade de qualquer rede ou sistema tem dois aspectos complementares: disponibilidade e desempenho. As questões que se colocam quando se equaciona a medição da qualidade de uma rede são naturalmente: os padrões a usar, os parâmetros a avaliar e os limites a considerar. Com essa intenção, neste capítulo, avaliam-se as técnicas de medição mais vulgarmente usadas para verificação do desempenho das fibras ópticas cabladas.

Estas técnicas podem ser organizadas em dois grupos distintos. O primeiro destes visa avaliar a infra-estrutura física instalada, incluindo não só os cabos de fibras ópticas, mas igualmente todos os elementos discretos, tais como conectores e juntas. Estão neste grupo a medição das perdas de inserção e de retorno e os traços com o OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*). O segundo grupo, visa avaliar o desempenho da infra-estrutura relativamente a sua capacidade de transmissão de sinais. Estão neste caso a determinação da atenuação e a verificação do atraso da PMD e da dispersão cromática.

Em linha com as considerações anteriores, este capítulo estrutura-se de forma a abranger algumas das metodologias para ensaios de campo. As metodologias apresentadas estão conforme as recomendações da ITU-T [1,21,26], e de outras organizações de referência, tal como o IEC, EIA/TIA [13,14,17] e em diversa literatura [2,4,5-7,10-12,15,16,18-22]. No Anexo B a este trabalho condensam-se essas técnicas de medição.

4.1 Determinação do valor da atenuação espectral em fibras cabladas

A medição do valor da atenuação numa dada ligação ou percurso óptico pode ser realizada para comprimentos de onda discretos ou num intervalo de comprimentos de onda [1-3,6,7-9,11,12,19-21]. Nesta secção avaliam-se as metodologias do retro espalhamento (*backscattering*) e das perdas de inserção.

4.1.1 Medição da atenuação espectral pelo método de retro espalhamento (ou reflectometria óptica)

A técnica reflectométrica baseia o seu funcionamento no efeito de Rayleigh e, consiste na medição da fracção da potência que retorna ao detector, de um impulso óptico injectado na fibra. O sinal que retorna da fibra, designado de assinatura da fibra, ou mais comumente, por traço do OTDR, apresenta um decaimento exponencial, que é função da atenuação na fibra, como mostra a Figura 4-1.

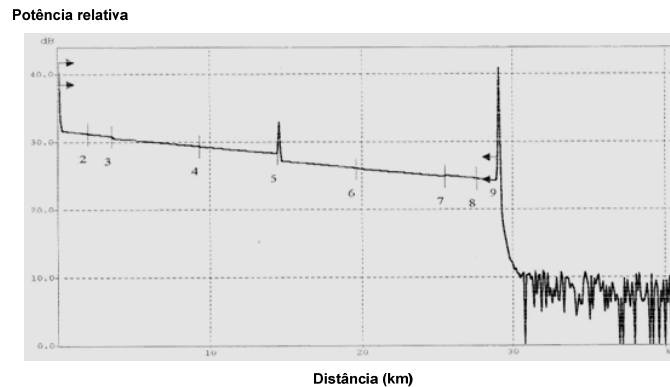


Figura 4-1: Exemplo de uma curva de retro dispersão unidireccional (traço do OTDR em 1550nm).

A separação espacial de amostras adjacentes, entre os eventos “5” e “6” da Figura 4-1, por exemplo, é função do ritmo amostral. A um ritmo amostral de 50 MHz, corresponde uma resolução espacial de ~2 m, usando o factor de conversão tempo/distância, ~10 $\mu\text{s}/\text{km}$ [7], que representa o atraso na propagação da luz ao percorrer todo o caminho na fibra de volta ao equipamento. Adicionalmente poderá ser necessário ajustar a largura do pulso de forma a obter-se um melhor compromisso entre a resolução espacial e a gama dinâmica, como veremos mais à frente.

A gama dinâmica da medição, definida como a diferença do nível de retro dispersão no início da fibra em teste e o nível médio do ruído, no qual a relação sinal-ruído (SNR) é 1 (0 dB) [7], a partir dos 30 km na Figura 4-1, e determina o comprimento máximo de fibra que é possível medir, pode ser melhorada através do aumento do número de amostras, num determinado período, resultando daí uma melhoria da sensibilidade no receptor, pela redução do ruído. Este processo pode ser verificado para dois tempos de aquisição diferentes; a) dentro do 1º segundo e b) após 3 minutos.

Assim, usando o factor de conversão tempo/distância, numa fibra com comprimento ~28 km (Figura 4-1), obtém-se um tempo de aquisição (T_A) = 280 μs , que corresponde a um número de amostras (N), respectivamente:

$$a) N_{1s} = 1 / T_{A1s} \approx 3571;$$

$$b) N_{3min} = T_{A1s} \times 180 = 642780.$$

Sendo a redução do ruído, proporcional à raiz quadrada de N [7], a SNR de ida e volta na fibra, é aumentada na proporção $\Delta SNR = 10 \log_{10}(\sqrt{N})$ [7], pelo que a melhoria dessa relação nos casos considerados é:

$$a) \Delta SNR_{1s} = 10 \times \log_{10}(\sqrt{5000}) \approx 17,8 \text{ dB};$$

$$b) \Delta SNR_{3min} = 10 \times \log_{10}(\sqrt{900000}) \approx 29 \text{ dB}$$

Dos resultados obtidos em a) e b) conclui-se ser o ganho da SNR no valor de $(29 - 17,8) / 2 \approx 5,6 \text{ dB}$. Esse ganho, com $\alpha = 0,25 \text{ dB/km}$, traduz-se numa autonomia acrescida do sistema em 22,6 km.

O comprimento de um segmento da fibra, L_f , pode ser determinado a partir do tempo de intervalo entre as extremidades da curva de perdas de retro dispersão, T_f , e do índice de refração de grupo, n_g , do seguinte modo [1]:

$$L_f = c \times T_f / n_g \quad (4-1)$$

onde c representa a velocidade da luz no vácuo.

No caso da Figura 4-1 e, para o evento “5”, por exemplo, que representa simultaneamente uma reflexão e uma perda, ou seja, corresponde a uma estação onde as fibras foram colocadas a direito (*by-pass*), $T_{f,5}$, pode ser determinado a partir da equação (4-1) fazendo L_f nesta situação, a distância entre o início da curva e do evento considerado, $\sim 14,4 \text{ km}$. Considerando, valores típicos de n_g , nas fibras monomodo padrão e de dispersão deslocada, em 1550 nm; 1,4681 e 1,4711 respectivamente, obtém-se; numa fibra da norma G.652 [32], $T_{f,5} = 70,5 \mu\text{s}$ e, numa fibra da norma, G.653 [21], $T_{f,5} = 70,7 \mu\text{s}$.

Relativamente ao nível de reflexão do evento “5” da Figura 4-1 (visto ampliado na Figura 4-2) e, dado que um OTDR não pode medir directamente a potência incidente, esta informação obtém-se indirectamente através do valor conhecido (ou estimado), da retro dispersão (σ) [7]. A relação entre a altura de um evento reflectivo (δ) e a reflexão é [7]:

$$\text{refl (dB)} = -\sigma + 10 \times \log_{10}(10^{0,2 \delta} - 1) \quad (4-2)$$

onde σ , é o factor de retro dispersão relativo à largura do evento. Por sua vez (σ) pode ser determinado a partir da seguinte relação [7]:

$$\sigma = -10 \times \log_{10} (S \times \alpha_s \times W) \quad (4-3)$$

onde S , é a porção do retro espalhamento que chega ao OTDR, W representa a largura de um evento discreto e α_s são as perdas devidas ao efeito de Rayleigh.

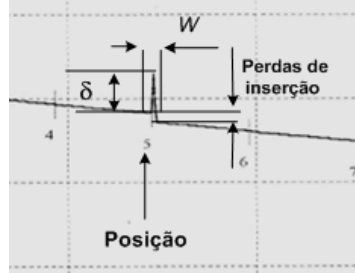


Figura 4-2: Parâmetros extraíveis de um evento reflectivo medido com um OTDR.

Assumindo alguns valores típicos para fibras monomodo em 1550nm [7]; $\alpha_s = 3,2 \times 10^{-2} \text{ km}^{-1}$ e $S = 10^{-3}$, determina-se sucessivamente; $\sigma = 51 \text{ dB } / \mu\text{s}$, e por fim, obtém-se um nível de reflexão de -42,9 dB, para o evento considerado.

Quanto às perdas de inserção associadas ao mesmo evento (da Figura 4-1), podem ser obtidas directamente da curva da recto dispersão, projectando as marcas correspondentes ao intervalo das perdas até ao eixo das ordenadas (Potência relativa), registando depois a diferença dos valores medidos. Assim, as perdas de inserção do evento 5 são de $\sim 1 \text{ dB}$.

O passo seguinte é obter as perdas bidireccionais para um evento discreto, usando as duas medições realizadas anteriormente, conforme a definição dada pela recomendação G.650 [1] da ITU-T:

$$y(x) = \frac{a_x - b(L_f - x)}{2} \quad (4-4)$$

Ainda relativamente ao evento “5” (das Figuras 4-1 e 4-2), embora se mostre apenas uma curva unidireccional (vista da fibra x , com volta pela fibra y), presumindo que a curva homóloga vista da fibra y , tem características semelhantes, então pela equação (4-4), a perda bidireccional desse evento, sendo a média das perdas de inserção vistas pelas duas fibras, tem o valor de 1 dB.

Na mesma recomendação da ITU-T, é ainda definida a forma como obter o coeficiente de atenuação, $A(x_0, x_1)$, para um segmento de fibra, compreendido entre os pontos x_0 e x_1 que definem espacialmente o segmento (com $x_0 < x_1$), e representam as suas posições extremas [1]:

$$A(x_0, x_1) = \frac{y(x_0) - y(x_1)}{x_1 - x_0} \quad (4-5)$$

Por último, o coeficiente de atenuação fim-a-fim de uma fibra, pode ser determinado do mesmo modo visto anteriormente, em que os pontos x_0 e x_1 deverão estar situados tanto quanto possível nas extremidades da fibra. Contudo estes mesmos pontos deverão cair fora das áreas da zona morta e de reflexão do aparelho.

O coeficiente de atenuação para o segmento da curva entre os eventos “4” e “5”, das Figuras 4-1 e 4-2, usando a equação (4-5) é; $\alpha(\lambda_{1550}) = \frac{(31,75 - 30,75)}{(14,4 - 8,6)} \approx 0,17 \text{ dB/km}$.

Em conclusão, a vantagem imediata na utilização desta metodologia é a da possibilidade de retirar informação de um conjunto relativamente grande de eventos discretos, os quais constituem a assinatura de uma fibra, como referido na literatura [3,7,8].

A principal limitação desta técnica é a que deriva da reflexão originada no acoplador direccionado do OTDR, a qual impede uma medição directa das perdas totais de inserção numa fibra. Contudo, esta limitação, é contornada usando-se um segmento de fibra (conhecida como bobina de carga) com características semelhantes a da fibra em teste e com um comprimento um pouco maior que o corresponde a zona morta do OTDR. Nessa situação, a posição extrema do segmento de fibra (x_0 , da equação 4-5), deverá estar localizado num ponto imediatamente após a conectorização da fibra da bobina de carga, com a fibra em teste.

4.1.2 Medição da atenuação em comprimentos de onda discretos pelo método das perdas de inserção

A ITU-T na sua recomendação G.957 [6] especifica que na determinação do valor das perdas de inserção numa ligação óptica para o pior caso, incluem-se todas as perdas devidas a juntas, conectores, atenuadores ópticos (caso existam) ou outros componentes passivos, e ainda qualquer margem de implementação.

A medição das perdas de inserção consiste sempre num processo a realizar em duas etapas: numa primeira processa-se a calibração do emissor, ou seja, regista-se o valor da potência óptica a injectar na fibra, para efeito de comparação e, numa segunda, realiza-se a medição no dispositivo em teste (DET), que poderá ser um segmento de fibra óptica, ou qualquer outro dispositivo (filtros, acopladores, atenuadores, etc.), registando-se igualmente os valores medidos. O valor medido na referência, normalmente em dBm, é depois subtraído aos valores obtidos na segunda etapa, obtendo-se assim, o valor da atenuação.

Idealmente, a troca das conectorizações na entrada do medidor de potência não deverá influenciar os resultados da medição. Contudo, na segunda etapa, é adicionado um novo par de conectores na configuração de teste e, por esse motivo, a medição das perdas de inserção por este método, incluem, além do DET, mais um par de conectores ópticos. Dado que o valor de perdas destes novos conectores, apenas pode ser estimado, resulta daqui, uma incerteza relativa associada à medição, na ordem dos $\pm 0,3$ dB [7].

Em face disso, a qualidade dos conectores existentes e genericamente a qualidade de qualquer dispositivo acoplado ao DET, influenciará o resultado da medição.

A medição das perdas totais de inserção para os comprimentos de onda discretos, 1310 e 1550 nm ($A_{1310, 1550}$) inicia-se com a configuração do medidor e da fonte óptica para um dos comprimentos de onda de trabalho, a 1310 nm, por exemplo, constituindo este procedimento a forma de determinar as perdas associadas ao sistema de medição, designando-se de referência.

Activa-se a fonte óptica e após aguardar um período de estabilização efectua-se uma medida de potência óptica em dBm ($P_{ref,1310}$) e toma-se nota desse valor. O medidor é depois acoplado na extremidade distante da ligação e efectua-se uma nova medição tomando-se nota do valor, P_{1310} .

O mesmo procedimento é depois repetido para o comprimento de onda 1550 nm ($P_{ref,1550}$ e P_{1550}). Todas as fibras numa ligação óptica são medidas conforme o critério descrito.

As perdas de inserção numa fibra ou dispositivo ópticos, são determinadas subtraindo o valor da referência ao valor medido de P_{1310} e P_{1550} , que incluem as perdas associadas ao sistema de medição.

$$A_{1310} = P_{1310} [dBm] - P_{ref,1310} [dBm] \quad (4-6)$$

$$A_{1550} = P_{1550} [dBm] - P_{ref,1550} [dBm] \quad (4-7)$$

O valor da atenuação, A (em dB), da secção da fibra em teste pode ser estimado usando-se a seguinte expressão [3]:

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_{out}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} + c_r - c_1 - c_2 \quad (4-8)$$

onde, P_{in} e P_{out} , representam os valores da potência óptica injectada e, medida à saída da fibra, respectivamente, em função do comprimento de onda. Os coeficientes, c_r , c_1 , e c_2 representam os valores médios das perdas nominais (expressos em dB) de todas as conectorizações, relativos, respectivamente, à condição de referência, e à entrada e saída da fibra em teste. Este valor (estimado) é importante para efeito de comparação com o obtido com as equações (4-6 e 4-7), ou

seja, permite verificar em que medida os diferentes componentes ópticos estão conforme com os padrões aplicáveis.

Após as medições efectuadas em todas as fibras e nos dois comprimentos de onda, o medidor é ligado directamente à fonte óptica para verificar se a potência de saída variou em relação ao valor inicial. A variação deverá ser inferior ao valor dado pelo fabricante para a estabilidade da fonte óptica e pode ser verificada do seguinte modo.

$$\left| P_{\text{ref, inicial}} - P_{\text{ref, final}} \right| \leq \text{Estabilidade da fonte óptica (em dB)} \quad (4-9)$$

caso essa variação seja superior ao limite especificado pelo fabricante as medições deverão ser repetidas corrigindo-se a metodologia ou usando-se aparelhagem de medida diferente.

Comparativamente com a solução anterior de medição das perdas de inserção (pela técnica reflectométrica), esta metodologia tem como desvantagem a incerteza associada ao valor de perdas dos conectores o que torna esta medição menos exacta. Associado a esse facto, acresce que a medição obriga a que o medidor de potência seja conduzido até à extremidade distante da fibra em teste, após calibração, pelo que a estabilidade deste equipamento deverá ser acautelada durante o transporte de ida e volta, dado que a ultima medição por este método, é realizada ligando directamente a fonte ao medidor, para efeito de comparação da potência do emissor, antes e após a medição.

4.2 Técnica do desvio de fase: Uma solução para medição do coeficiente de dispersão cromática

A dispersão é um fenómeno, que como visto na secção 2.2.1, resulta da dependência do índice de refração com o comprimento de onda. Daí que, quanto maior for a largura de banda do sinal enviado, ou o facto de serem usados multi-comprimentos de onda (WDM), maiores serão os problemas expectáveis que podem advir causados pela dispersão.

A solução para a medição da dispersão cromática, denominada de desvio de fase, vai ser orientada, dentro do possível, para fibras da norma G.653 [21] da ITU-T, dado ser objectivo do presente trabalho a optimização de redes ópticas onde se usa predominantemente esse tipo de fibras [1,3,7-9,13-16,19-21]. Contudo, dado que as redes ópticas actuais se constituem maioritariamente por fibras da norma G.652 [26], é importante nesse contexto, avaliar igualmente o efeito da dispersão cromática nesse tipo de fibras.

O coeficiente de dispersão cromática (D), deriva do atraso relativo de grupo, experimentado pelos vários comprimentos de onda ao propagarem-se através de um comprimento de fibra

conhecido. O atraso de grupo é medido no domínio do tempo, pela detecção do desvio de fase num sinal sinusoidal modulado.

O desvio relativo da fase é convertido em atraso no tempo com recurso da equação (4-12) e, os dados resultantes (relativos ao atraso relativo de grupo), são depois normalizados por uma das equações, 4-13 ou 4-14, consoante se trate de fibras das normas; G.652 [26] ou G.653 [21], respectivamente, para posterior determinação do parâmetro D [13]. No caso das fibras da norma G.653 [21], esse parâmetro pode ser determinado pela equação (2-9).

Nesta medição é importante, prevenir a ambiguidade resultante dos desvios de fase de $n \cdot 360^\circ$ (onde n é um inteiro). Nas fibras norma G.652 [26], a frequência máxima, f_{\max} (em MHz) para um desvio de fase $= 360^\circ$ pode ser determinada por [13]:

$$f_{\max} = \frac{8 \times 10^6}{S_0 L} \left[\left(\lambda_i - \lambda_0^2 / \lambda_i \right)^2 - \left(\lambda_j - \lambda_0^2 / \lambda_j \right)^2 \right]^{-1} \quad (4-10)$$

onde, L representa o comprimento expectável de fibra a medir, S_0 é o valor expectável da inclinação da dispersão, no comprimento de onda de dispersão nula (λ_0) e, λ_i e λ_j formam um par de comprimentos de onda usados na medição, que minimizam f_{\max} .

A frequência do modulador deverá ser suficientemente elevada para garantir a precisão da medição. Ainda relativamente às fibras norma G.652 [26], a dependência da precisão dos parâmetros do sistema de medição, pode ser verificada, por exemplo, para um valor mínimo da frequência de modulação (f_{\min} , em MHz) dado por [13]:

$$f_{\min} = \frac{\Delta\phi \times 10^7}{L(\Delta\lambda)^2} \quad (4-11)$$

em que no intervalo de comprimentos de onda ($\Delta\lambda$) os erros máximos admissíveis são; 1,2 fs/nm².km para (S_0) e 0,4 nm para (λ_0) e onde, $\Delta\phi$, representa a instabilidade total de fase da fonte, L é o comprimento da fibra em teste [13]. Num exemplo, tomando os valores de 0,1°, 50 km e 32 nm, para $\Delta\phi$, L e $\Delta\lambda$, respectivamente, $f_{\min} \approx 20$ MHz.

O sinal transmitido na fibra em teste é detectado e a sua fase é comparada com o sinal de referência usado na modulação do sinal injectado na fibra. Este procedimento repete-se para todos os intervalos de comprimento de onda de interesse, obtendo-se desta forma a curva característica do perfil da dispersão cromática da fibra em teste.

O valor da fase à entrada na fibra, para cada comprimento de onda, deverá ser subtraída, ao valor medido à saída da fibra em teste. O atraso relativo de grupo (em ps/km) pode ser obtido do seguinte modo [13]:

$$\tau(\lambda_i) = [\varphi_{\text{out}}(\lambda_i) - \varphi_{\text{in}}(\lambda_i)] \times 10^6 / (360^\circ fL) \quad (4-12)$$

onde, $\varphi_{\text{out}}(\lambda_i)$ e $\varphi_{\text{in}}(\lambda_i)$ foram medidos no passo anterior, f representa a frequência de modulação da fonte óptica e L é a distância (conhecida) da fibra em teste.

A precisão da medição da dispersão cromática é grandemente influenciada pelo modelo computacional usado na aquisição dos dados do atraso relativo de grupo. Esse modelo computacional é escolhido conforme o tipo de fibra a medir [1].

a) Para fibras norma G652 [26]:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{8} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right)^2 \quad (4-13)$$

b) Para fibras norma G653 [21]:

$$\tau(\lambda) = \tau_0 + \frac{S_0}{2} (\lambda - \lambda_0)^2 \quad (4-14)$$

onde τ_0 representa o atraso relativo (mínimo) em λ_0 .

Contudo, e na pratica, os equipamentos de medida, trabalham com modelos, baseados na aproximação dada pela diferenciação do quinto termo da equação de Sellmeier [12-14], que contem termos de λ elevados às potências de +2, -2, +4 e, -4. Este modelo, pode ser usado indistintamente na avaliação das fibras das normas G.652 [26] e G.653 [21] da ITU-T. A equação resultante tem a seguinte forma [13]:

$$D(\lambda) = A\lambda + B\lambda^{-3} + C\lambda^3 + D\lambda^{-5} \quad (4-15)$$

onde A , B , C e D , são os parâmetros que normalizam os dados.

De seguida, apresentam-se valores característicos dos parâmetros de normalização das fibras, obtidos em medições de fábrica (realizadas em Maio de 2006), em fibras das normas G.652 [26] e G.653 [21] da ITU-T, com comprimentos de 6050 m e 6112 m, respectivamente [27,28]:

a) Em fibras SMF:

$$A = 2,08999 \text{ E}^{-2}, B = -7,09174 \text{ E}^{+10}, C = 5,44031 \text{ E}^{-10} \text{ e}, D = 9,58693 \text{ E}^{+15}.$$

b) Em fibras DSF:

$$A = -6,54926 \text{ E}^{-3}, B = -5,93477 \text{ E}^{+10}, C = 6,83871 \text{ E}^{-9} \text{ e}, D = 3,94423 \text{ E}^{+15}.$$

nessas condições, em a) $D = -0,459$ e $16,448$ (ps/nm.km) em 1310 e 1550 nm, respectivamente, com $\lambda_0 = 1315,334$ nm e $S_0 = 85,54$ fs/nm².km e, em b) $D = -18,582$ e $-0,181$ (ps/nm.km) em 1310 e 1550 nm, respectivamente, com $\lambda_0 = 1552,509$ nm e $S_0 = 72,14$ fs/nm².km.

A Figura 4-3 mostra os dados experimentais da normalização do atraso espectral de grupo derivados dos parâmetros anteriormente apresentados. Os intervalos de comprimentos de onda medidos foram, em fibras DSF: entre 1270 e 1330 nm e entre 1520 e 1570 nm e nas fibras SMF: entre 1270 e 1370 e entre 1520 e 1580 nm, com incrementos de 10 nm, em ambas situações.

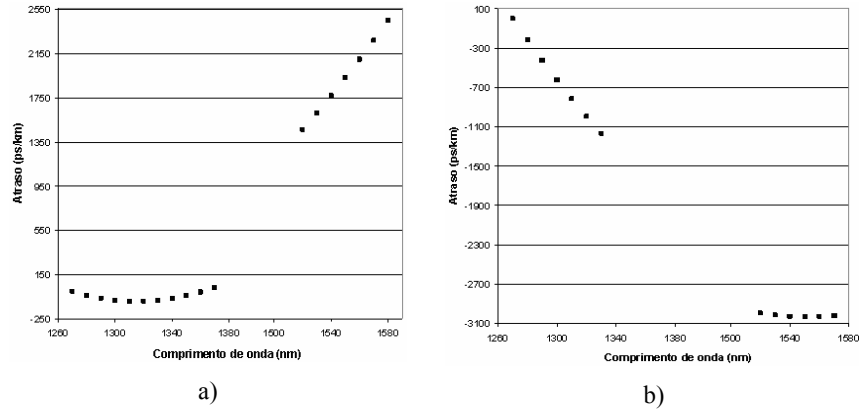


Figura 4-3: Dados experimentais da normalização dos dados do atraso espectral de grupo em fibras monomodo: (a) SMF e (b) DSF, respectivamente.

A curva do atraso de grupo é construída a partir da acumulação dos desvios no atraso de grupo para o conjunto de intervalos de comprimento de onda de interesse, usando a equação (4-12).

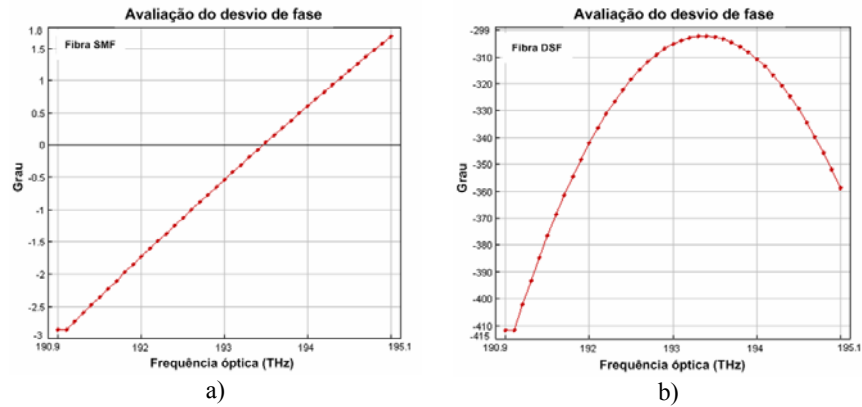


Figura 4-4: Curva do desvio de fase obtida na avaliação de D em fibras SMF (a) e em fibras DSF (b), respectivamente.

A Figura 4-4 mostra curvas dos desvios de fase feitas em fibras SMF e DSF, relativamente à frequência óptica, obtidas com recurso da simulação, correspondente à região espectral situada entre 1536,3 e 1569,5 nm. Por último, na Figura 4-5 mostra-se o perfil da dispersão medido em fibras SMF e DSF, obtido experimentalmente, no intervalo de comprimentos de onda da Figura 4-3.

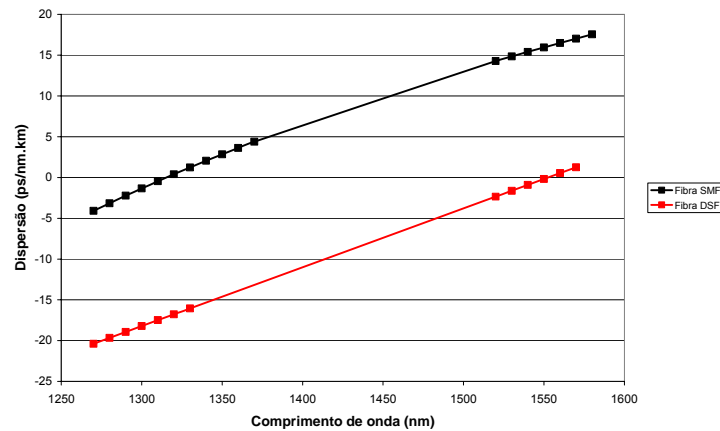


Figura 4-5: Coeficiente de dispersão cromática medido em fibras SMF e em fibras DSF, no intervalo de comprimentos de onda da Figura 4-3. Os pontos a cheio correspondem a valores efectivamente medidos e as linhas servem como auxiliar de visualização.

A medição da dispersão cromática, por esta técnica, realiza-se tipicamente, em janelas ópticas bem definidas como mostram as Figura 4-3 e 4-5, dado tratarem-se dos intervalos de comprimentos de onda com maior interesse para as telecomunicações.

A escolha da frequência de modulação deve ter em conta e, por antecipação, o comprimento e a dispersão da fibra a medir, bem como, a resolução espacial adequada ($\Delta\lambda$) para cada medição. Os equipamentos de medida operam normalmente, nos seguintes intervalos; f , entre 2 kHz e 50 MHz e, $\Delta\lambda$, entre 2 e 40 nm.

Para assegurar a selecção correcta dos parâmetros a introduzir nos equipamentos de medida, os fabricantes adoptam uma regra pratica, em que, o produto de D (em ps/nm.km), L (em km), f (em MHz) e $\Delta\lambda$ (em nm), não deverá exceder 75.000, jogando com os valores de f e $\Delta\lambda$. Operando fora destes limites, poderá resultar em medições erróneas ou inconsistentes [13].

Em conclusão, a técnica do desvio de fase, assenta no princípio de que a medição da fase é medida sem ambiguidade, para desvios de fase $\pm 180^\circ$. Portanto, para um dado incremento no comprimento de onda, uma frequência mais elevada de modulação, poderá introduzir uma alteração de fase, superior à que o equipamento pode medir, por exemplo, em fibras muito longas. Pelo contrário em fibras muito curtas, a alteração de fase, poderá não ser suficiente, para ser perceptível pelo equipamento, tornando-se dessa forma inconsistente, mesmo quando se alteram os parâmetros da frequência de modulação e/ou da resolução espacial ($\Delta\lambda$). Por esse motivo, considera-se que a distância mínima de ser medida, com esta técnica, é ≥ 1 km.

4.3 Técnica interferométrica: Uma solução para medição da PMD

Como foi descrito na secção 2.2.1, a energia de um sinal para um dado comprimento de onda, ocupa dois modos polarizados ortogonalmente, num processo designado de acoplamento dos modos.

Em geral, uma fibra, exibirá na sua saída, uma polarização caracterizada por um caminho irregular numa esfera de Poincaré, dependendo do comprimento de onda. Num pequeno intervalo de comprimentos de onda, cada porção desse caminho pode ser representado, por um arco de círculo. O centro desse arco, projectado à normal do plano, que o arco faz com a superfície da esfera, localiza dois estados, que são diametralmente opostos e portanto, ortogonais, designados de estados principais de polarização (PSP - *Principal States of Polarization*) [1,3,7,8].

Assim, os atributos que definem a PMD são o atraso diferencial de grupo ($\Delta\tau_{pol}$) e os estados principais de polarização, $PSP_{1,2}(\lambda)$. O nível de dispersão relaciona-se com a diferença nos atrasos diferenciais de grupo (DGD) associados aos dois estados de polarização, como se pode analisar graficamente pela observação da esfera de Poincaré na Figura 4-6.

O efeito da dispersão de um impulso óptico devido à PMD tende a desvanecer-se quando apenas um dos estados de polarização é excitado e mantido ao longo da propagação, dado nessa situação não existirem modos acoplados. Pelo contrário, o máximo de dispersão ocorre quando ambos os estados principais estão excitados igualmente, em função dos modos de acoplamento.

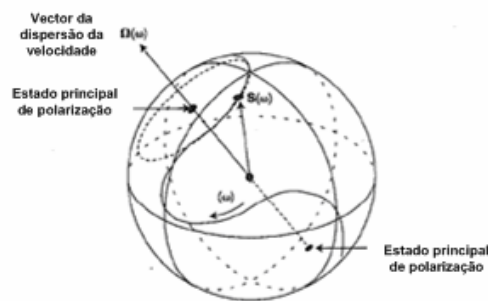


Figura 4-6: Representação vectorial, numa esfera de Poincaré, da dispersão devido a PMD.

Nas fibras que exibam modos de acoplamento variáveis, a PMD progride numa razão com a raiz quadrada do comprimento da fibra [1,3,7,8]. Num sistema com N fontes individuais de PMD, a PMD total pode ser estimada a partir da seguinte relação [1,7]:

$$\text{Valor (médio) total da DGD} \approx \sqrt{\langle \Delta\tau_1 \rangle^2 + \langle \Delta\tau_2 \rangle^2 + \dots + \langle \Delta\tau_N \rangle^2} \quad (4-16)$$

onde se considera a contribuição de cada fonte individual para o valor total (médio) da PMD. Na determinação do valor total da PMD num dado percurso óptico, constituído pela concatenação de n

troços de fibra, nos quais foi caracterizada individualmente a PMD média, obtém-se pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores médios de cada troço de fibra e, não pela média aritmética simples, dado o facto da PMD variar inversamente com a raiz quadrada da distância.

A recomendação G.650 [1] da ITU-T especifica que a equivalência das três definições que abaixo se discriminam, se entendem dentro da reprodutibilidade da metodologia de ensaio do atraso da PMD, que se avalia neste capítulo.

O segundo momento do atraso da PMD, P_s , é definido como duas vezes o desvio padrão (2σ) da distribuição dependente da intensidade da luz, $I(t)$, descontando a contribuição da dispersão cromática, quando um impulso curto for lançado na fibra, isto é, [1]:

$$P_s = 2 \left(\langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{\int I(t) t^2 dt}{\int I(t) dt} - \left(\frac{\int I(t) t dt}{\int I(t) dt} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (4-17)$$

onde, t representa o tempo de chegada do sinal à saída da fibra.

O atraso diferencial médio, P_m , é o atraso diferencial de grupo, $\Delta\tau(\nu)$, médio, entre estados principais de polarização, sobre um dado intervalo de frequências ópticas (ν_1, ν_2) [1]:

$$P_m = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \Delta\tau(\nu) d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \quad (4-18)$$

Por último, o valor r.m.s., do atraso diferencial de grupo, P_r , é definido como [1]:

$$P_r = \left(\frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} \Delta\tau(\nu)^2 d\nu}{\nu_2 - \nu_1} \right)^{1/2} \quad (4-19)$$

Consequentemente, o coeficiente da PMD (D_{PMD}) pode ser determinado por uma das três expressões seguintes [1]:

$$\begin{aligned} D_{PMD} &= P_s / \sqrt{L} \\ &= P_m / \sqrt{L} \\ &= P_r / \sqrt{L} \end{aligned} \quad (4-20)$$

onde, P_s é o segundo momento do atraso da PMD, P_m é o atraso diferencial médio de grupo e P_r representa o valor r.m.s. do atraso diferencial de grupo, vistos anteriormente e, L , é o comprimento (conhecido) da fibra a medir.

4.3.1 Técnica interferométrica

O valor obtido por meio desta técnica representa o atraso da PMD sobre um intervalo de comprimentos de onda tipicamente de 60 a 80 nm. Esse valor é determinado a partir da função de auto-correlação ou da correlação cruzada, do campo electromagnético emergente numa extremidade da fibra em teste, quando iluminado por uma fonte de largo espectro na extremidade oposta. No caso do equipamento de medida ser baseado na auto-correlação, o interferograma tem um pico central de coerência, correspondente ao de auto-correlação da fonte óptica [1], observável na Figura 4-8(b).

A vantagem principal deste método é do tempo de medida ser baixo e o equipamento de medida poder facilmente ser usado em medições de campo. A fibra deverá ser monomodo em toda a gama de comprimentos de onda a medir [1]. Muito embora a amostra em teste seja normalmente fibra, este teste pode ser igualmente aplicado a componentes discretos. Nessa situação, o coeficiente de PMD pode não ser relevante.

O formato dos impulsos, injectados na fibra, deverá ser aproximadamente gaussiano, sem *ripple*, que poderia influenciar negativamente a função de auto-correlação da luz emergente na extremidade distante da fibra. A largura espectral da fonte, $\Delta\lambda$, deverá ser conhecida de forma a poder ser calculado o tempo de coerência [1,2], t_c , o qual pode ser determinado por [1,7]:

$$t_c = \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda c} \quad (4-21)$$

Considerando inicialmente a configuração de teste sem a fibra a medir, situação reproduzida na Figura 4-7 a luz proveniente da fonte óptica, é acoplada nos dois braços do interferómetro e, a luz proveniente dos dois espelhos; móvel e fixo, sobrepõem-se no detector.

A interferência ocorre quando o comprimento dos dois braços do interferómetro difere um pouco menos que o comprimento de coerência [3] da fonte óptica. O máximo de visibilidade ocorre quando esse comprimento é igual. A rapidez da resposta é inversamente proporcional a largura espectral da fonte [7].

[1] Coerência, é a estabilidade de fase da onda, no tempo e, no espaço. Operacionalmente, é a habilidade de uma oscilação produzir interferências observáveis com uma amostra atrasada ou desfasada de si mesma.

[2] Tempo de coerência, é a medida estatística do intervalo de tempo durante o qual os sinais recebidos permanecem fortemente correlacionados; o tempo de coerência é inversamente proporcional ao espalhamento doppler; este parâmetro contribui para a caracterização da variação temporal de um canal, nesta situação causada pelo movimento relativo dos espelhos.

[3] Comprimento de coerência: Com respeito à luz laser, a maior distância entre dois componentes de luz (isto é, dois feixes) dentro da qual os efeitos interferométricos irão ocorrer.

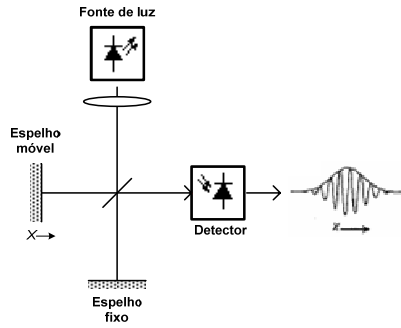


Figura 4-7: Representação de um interferômetro básico de Michelson.

A amplitude de envelope da foto-corrente é visualizada em função do tempo de atraso introduzida pelo movimento do espelho. O tempo de atraso, Δt , é dado por [7]:

$$\Delta t = \frac{2\Delta x}{c} \quad (4-22)$$

onde, Δx , é a distância do espelho ao ponto de equilíbrio dos dois braços e c a velocidade da luz no vazio.

A Figura 4-8(b) exibe um interferograma de uma fibra com modos de acoplamento fortes, ou seja, onde por efeito da birrefringência na fibra, os dois estados principais de polarização são excitados. Os modos acoplados aleatoriamente, os quais possuem a forma de *ripple*, seguem uma distribuição Gaussiana.

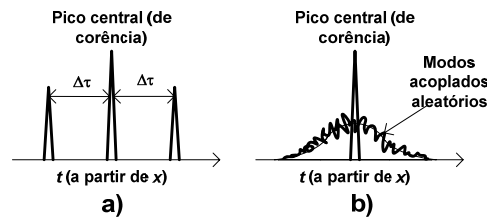


Figura 4-8: Interferograma de um padrão de franjas medido em: a) modos de acoplamento fracos e b) modos de acoplamento fortes.

O envelope da foto-corrente, que representa os modos acoplados aleatoriamente, tem um formato Gaussiano (Figura 4-8(b)), com uma largura que é função do valor da PMD da fibra em teste. A PMD pode ser determinada a partir do valor da foto-corrente usando um dos seguintes métodos: directamente do interferograma, dado este ser função do parâmetro largura (σ), ou seja, da porção da curva gaussiana que cai dentro do interferograma equação (4-23) e corresponde ao valor r.m.s. da DGD, ou pela computação do segundo momento da PMD (equação 4-24) que dá a indicação do valor médio da DGD [1,7,17].

$$\langle \Delta \tau^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (4-23)$$

$$\langle \Delta \tau \rangle = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \quad (4-24)$$

em que σ é o desvio padrão da curva gaussiana.

Mais comumente a PMD é determinada usando um algoritmo baseado na raiz quadrada do segundo momento da resposta da foto-corrente, o qual pode ser determinado a partir de [1,7]:

$$\sqrt{\frac{\int I(t)t^2 dt}{\int I(t)dt}} \quad (4-25)$$

onde, $I(t)$, representa a foto-corrente. O desenvolvimento desse algoritmo é feito na secção seguinte, onde se estima o valor do atraso da PMD, a partir da leitura de um interferograma.

Alternativamente, a PMD pode ser determinada a partir do segundo momento (σ_ϵ), sem a substituição Gaussiana. O segundo momento da PMD (σ_ϵ) relaciona-se com σ , do seguinte modo [7]:

$$\sigma_\epsilon \approx \sqrt{\frac{3}{4}} \sigma \quad (4-26)$$

4.3.2 Determinação do atraso da PMD pela leitura de um Interferograma

Nesta secção realizamos um exercício prático de determinação do atraso da PMD a partir de um interferograma, com um pico de auto-correlação ao centro da Figura 4-9, obtido em 2006 no âmbito da certificação de uma parte da rede óptica.

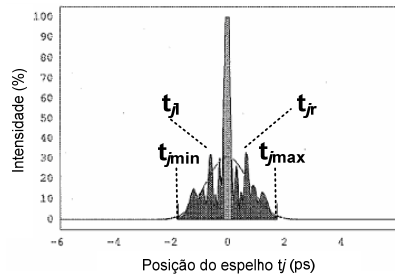


Figura 4-9: Interferograma de um padrão de franjas obtido com o método de auto-correlação para o modo de acoplamento forte.

O desenvolvimento do algoritmo realiza-se através de um processo em 9 passos, de acordo com a recomendação G.650 [1] da ITU-T e envolve algum desvio em amplitude, em consequência

das sucessivas manipulações realizadas, nomeadamente; em resposta à redução do efeito do ruído, na remoção do pico central de autocorrelação, na truncagem do interferograma e, posterior determinação do segundo momento após truncagem.

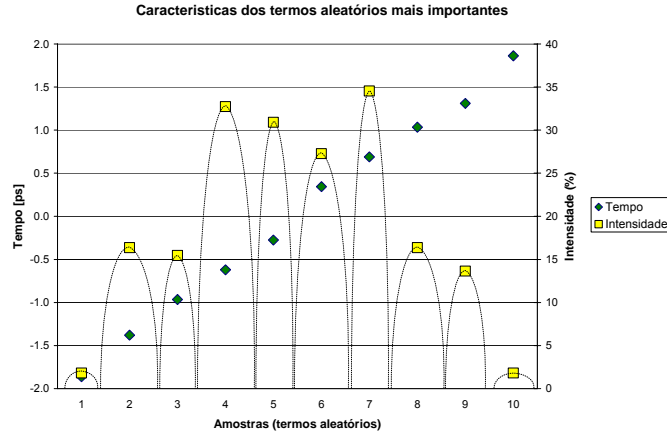


Figura 4-10: Caracterização dos termos aleatórios do interferograma da Figura 4-9 (a pontado na figura), sem o pico central de auto-correlação.

Na avaliação que se segue, considera-se \tilde{I}_j uma indicação da intensidade, correspondente às posições mais elevadas do espelho, t_j (relativamente ao ponto de equilíbrio dos dois braços do interferómetro), com $j = 1, \dots, N$, e, t_j (em ps).

1º Passo: Determinação da intensidade zero (\tilde{I}_0) e da amplitude do ruído (Na).

Na determinação de \tilde{I}_0 e de Na usam-se as seguintes expressões [1]:

$$\tilde{I}_0 = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} (\tilde{I}_j + \tilde{I}_{N-j})}{2N_s} \approx 0,333$$

$$X_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_s} (\tilde{I}_j^2 + \tilde{I}_{N-j}^2)}{2N_s} \approx 0,113$$

$$Na = \sqrt{X_2 - \tilde{I}_0^2} \approx 0,049$$

com $N = 10$, que constituem os termos aleatórios mais significativos (da Figura 4-9). \tilde{I}_j e \tilde{I}_{N-j} são o par com maior intensidade, a que correspondem as posições t_{j1} e t_{jr} do interferograma. Os valores característicos dos termos mais significativos mostram-se na Figura 4-10.

2º Passo: Determinação do desvio de (I_j).

De acordo com as condições [1]:

$$\begin{aligned} I_j &= \tilde{I}_j - \tilde{I}_0; \text{ se } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 > 4Na \Leftrightarrow \tilde{I}_j > 4Na + \tilde{I}_0 \Rightarrow \tilde{I}_j > 0,528 \\ I_j &= 0; \text{ se } \tilde{I}_j - \tilde{I}_0 \leq 4Na \Leftrightarrow \tilde{I}_j \leq 4Na + \tilde{I}_0 \Rightarrow \tilde{I}_j \leq 0,528 \end{aligned}$$

Sendo o maior valor de I_j , no interferograma, de $\sim 0,346$ (que corresponde a 2ª condição acima), pelo que se considera não existir desvio de intensidade, pela condição $I_j = 0$.

3º Passo: Definição do centro (C) do interferograma. [1]:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^N t_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \approx 8,9 \text{ fs}$$

4º Passo: Remoção do pico de auto-correlação central.

De acordo com as condições [1]:

$$\begin{aligned} j_l &\text{ é o maior índice de } j, \text{ tal que, } C - t_j > \tau_c \Leftrightarrow t_j < -\tau_c + C \\ j_r &\text{ é o menor índice de } j, \text{ tal que, } t_j - C > \tau_c \Leftrightarrow t_j > \tau_c + C \end{aligned}$$

em que τ_c representa o tempo de coerência da fonte óptica. Usando a equação (4-22), com $\lambda_c = 1550 \text{ nm}$ e $\Delta_c = 60 \text{ nm}$, equivale a $\tau_c \approx 0,134 \text{ ps}$, pelo que as condições anteriores ficam:

$$\begin{aligned} \text{para } j_l \text{ maior índice de } j &\Rightarrow t_j < -0,125 \text{ ps} \\ \text{para } j_r \text{ menor índice de } j &\Rightarrow t_j > 0,143 \text{ ps} \end{aligned}$$

o que se verifica, pela observação das Figuras 4-9 e 4-10.

5º Passo: Determinação do 2º momento (S) do interfereferograma [1]:

$$S = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=1}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^N (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^N I_j}} \right\} \approx 0,982 \text{ ps}$$

6º Passo: Truncagem do interferograma.

De acordo com as condições [1]:

Fixar j_{\min} como o maior índice de j , tal que, $C - t_j > 2S \Leftrightarrow t_j < -2S + C \Rightarrow t_j < -1,956$

Fixar j_{\max} como o menor índice de j , tal que, $t_j - C > 2S \Leftrightarrow t_j > 2S + C \Rightarrow t_j > 1,974$

o que já se verifica, pelo intervalo imposto $t_{j,\min}; t_{j,\max}$ observável nas Figuras 4-9 e 4-10.

7º Passo: Determinação do 2º momento (σ_ε) após truncagem do interferograma [1]:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_{\min}}^{j_l} I_j}} + \sqrt{\frac{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} (t_j - C)^2 I_j}{\sum_{j=j_r}^{j_{\max}} I_j}} \right\} \approx 0,792 \text{ ps}$$

8º Passo: Determinação de $\sigma_{[1]}$:

A partir da relação σ e σ_ε (valor médio e r.m.s.) dada pela equação (4-26), ou seja, $\sigma_\varepsilon / \sigma \approx \sqrt{3/4}$, pode ser estimado um valor aproximado do desvio padrão da curva Gaussiana, das Figuras 4-9 e 4-10, que corresponde aos termos acoplados aleatoriamente, excluído o pico central. Assim, esse valor de σ é de 0,915 ps.

9º Passo: Determinação do atraso da PMD ($\Delta\tau_{[1]}$):

Finalmente, com recurso da equação (4-24) obtém-se um atraso da PMD $\approx 0,73$ ps.

4.4 Medição das perdas ópticas de retorno

Conforme os sinais ópticos se propagam na fibra, uma parte da potência é reflectida de volta a fonte óptica emissora, maioritariamente devido a reflexões de Fresnel e a alterações do índice de refração ao longo da própria fibra [1,3,7-9,19-25]. Componentes ópticos discretos, tais como; conectores, juntas mecânicas, atenuadores, cordões ópticos, terminações do tipo vidro/ar, todos eles originam alterações ao índice de refração visto por um sinal óptico. Este tipo de componentes são por natureza reflectivos e podem contribuir significativamente para um mau desempenho de uma ligação óptica em termos das perdas ópticas de retorno (ORL – *Optical Return Loss*).

A fracção da potência por retro espalhamento na fibra não pode ser eliminada muito embora seja normalmente de uma magnitude muito inferior à potência óptica reflectida por componentes discretos. A amplitude de uma reflexão discreta é dada pela razão da potência óptica reflectida com

respeito à potência óptica incidente no mesmo componente discreto, $R = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_i} \right); \leq 0$. O

somatório de todas as reflexões discretas mais a retro dispersão na fibra constitui a potência óptica total reflectida vista por uma determinada interface do sistema, expressa igualmente numa razão logarítmica [1,3,7,8]:

$$ORL = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_e}{P_i} \right) (\geq 0) \quad (4-27)$$

onde, P_i é a potência óptica injectada na fibra, ou num componente discreto e, P_e , representa o somatório de todas as reflexões.

As técnicas mais usadas para medição da ORL, são; a reflectometria óptica da onda continua (OCWRt – Optical Continuous Wave Reflectometry), que tem o mesmo acrónimo do equipamento de medida, a qual iremos analisar nesta secção e, através das medições com OTDR, que foram discutidas anteriormente na secção 4.1.1. Na Figura 4-11 mostra-se o diagrama de blocos de uma configuração para a medição da ORL, onde se evidenciam os principais componentes usados neste tipo de medição [1,8,20,22].

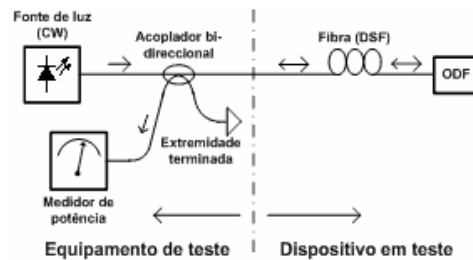


Figura 4-11: Exemplo de uma configuração para medição do valor das perdas totais de retorno [3].

A fonte óptica na Figura 4-11, deverá emitir um sinal estabilizado e continuo (CW- *continuous wave*) na fibra óptica ou num dispositivo em teste e, o acoplador direccional, realiza a dupla tarefa de envio do sinal para a fibra e de recolha da potência óptica retro dispersa, para o medidor.

O medidor de potência, poderá ser qualquer detector óptico CW com gama dinâmica suficiente. Usualmente, os medidores de potência têm uma gama dinâmica na ordem dos 60 dB ORL [7] e, deverão operar a 1310, 1550 e 1625 nm, de forma a flexibilizar a caracterização da fibra, tendo em conta os diferentes tipos de aplicações, que transmitem nas bandas C + L, por exemplo, os sistemas DWDM (de 1520 a 1620 nm) e, os sistemas metropolitanos, que operam nos 1310 nm.

De forma a ser realizada uma medição fiável das perdas totais de retorno, todas as potências ópticas por efeito do retro espalhamento da luz deverão ser registadas e tidas em consideração. Estas reflexões não desejadas limitam a sensibilidade da própria medição.

Tal como mostra a Figura 4-11, o retro espalhamento da luz pode ter origem em reflexões discretas, tais como as que ocorrem; no acoplador bi-direccional (de 3 dB), no acoplamento da fibra óptica ao dispositivo de teste e ainda na terminação das fibras (ODF – *Optical Distribution Frame*). Tipicamente a terminação das fibras em ODF é feita através da fusão de um cordão óptico à fibra. A reflexão provocada na extremidade não terminada do acoplador pode ser diminuída para valores inferiores a -70 dB, através da clivagem e polimento da face na extremidade da fibra, com um ângulo suficiente ($\geq 8^\circ$) [3,7].

Se na ligação do dispositivo de teste forem usados conectores do tipo standard PC (*Physical Contact*), a reflectividade residual é da ordem dos -30 a -40 dB. Podem obter-se valores de reflectividade inferiores a -60 dB usando conectores do tipo APC (*Angled Physical Contact*). Outra alternativa é eliminar as conectorizações na fibra fazendo-se fusões.

O procedimento de medição envolve normalmente três etapas distintas, que a seguir se descrevem, de uma forma sucinta:

- a) O primeiro passo é o da calibração do medidor de potência óptica usando-se um valor conhecido de reflectância, para que potência medida possa ser relacionada com a reflectividade óptica.
- b) O segundo passo consiste na medição da potência óptica total reflectida, incluindo a fibra e o equipamento de teste.
- c) O último passo consiste na eliminação das reflexões originadas no equipamento de teste, de forma a obter-se o valor do ruído residual, sendo depois este subtraído à potência óptica medida no passo anterior, para finalmente ser encontrado o valor da perda total de retorno da fibra em teste.

Esta metodologia pode ser melhor entendida com um exercício prático que a seguir se descreve. Considerando um percurso óptico com terminações do tipo FC/PC, com um comprimento de 55 km e atenuação total ~12 dB, a que corresponde $\alpha = 0,22$ dB/km, incluindo as perdas de inserção nos conectores ópticos. O emissor disponibiliza uma potência de 1 mW (0 dBm) em 1550 nm. Seguindo a metodologia de 3 etapas anteriormente descritas para avaliação da ORL:

- a) *Calibração do medidor.*

Um factor de calibração muito usado é o efeito da reflexão de Fresnel obtida numa interface fibra-ar, num normal conector do tipo PC (*Polished Connector*) quando desconectorizado. Este valor ronda os -14,7 dB em 1550 nm. Após um tempo de estabilização da fonte, leu-se no medidor um valor de 6,3 μ W (-22 dBm), que

inclui, as perdas de 3 dB no acoplador, a reflectividade usada na referência e as perdas no cordão óptico e conectores.

b) *Medição da reflectividade total.*

De seguida e, após conectorizar a fibra ao sistema de medição, tendo o cuidado de não desligar o emissor, é feita uma nova medição. Nesta situação, leu-se no medidor um valor de 178,1 nW (-37,5 dBm), que inclui todos os factores de perdas anteriores, mais as perdas na fibra e conectores.

c) *Subtracção das reflexões residuais.*

Na última etapa do processo, no cordão óptico que liga o acoplador à fibra, são feitas 7 a 10 voltas apertadas, para que toda a energia da fonte óptica seja aí dissipada, eliminando a reflectividade vinda da fibra. Após uma nova medição leu-se no medidor um valor de 190,5 pW (-67,2 dBm). Este valor representa o valor da reflexão residual, associado ao sistema de medição.

A potência óptica reflectida no conjunto, fibra e pelo último conector na extremidade distante da fibra, pode agora ser calculada, subtraindo as reflexões residuais ao valor anteriormente medido no 2º passo. Ou seja, $178,1 \text{ nW} - 0,19 \text{ nW} \approx 177,9 \text{ nW}$ (-37,5 dBm). Essa potência é 15,5 dB menor que a medida em a) (-22 dBm), resultando daqui, que a reflectividade é $-14,7 \text{ dB} + -15,5 \text{ dB} = -30,2 \text{ dB}$. Este valor expresso como valor total das perdas de retorno, é de 30,2 dB.

O resultado da medição deverá ser posteriormente confrontado com a especificação do sistema a implementar tendo por base as especificações das recomendações da ITU-T, as quais são sumariadas no Anexo C a este trabalho. Na eventualidade dos valores medidos excederem os valores toleráveis, deverá fazer-se uma verificação “a-posteriori” com um OTDR a todos os elementos discretos da rede óptica para despiste de problemas e eventual substituição de componentes.

Fazendo um breve resumo comparativo das metodologias avaliadas; a medição da ORL com OTDR é mais fácil, dado não ser necessária uma referência da potência injectada na fibra, para efeito de calibração do sistema medidor. Contudo, a metodologia OCWRt é mais precisa (com uma incerteza da ordem $\pm 0,5 \text{ dB}$), enquanto essa incerteza sobe para $\pm 2 \text{ dB}$, usando um OTDR [7], para além de que, usando a primeira das metodologias, é possível medir pequenos troços de fibra, por exemplo, cordões ópticos, com 1 ou 2 metros apenas.

4.5 Referências

- [1] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres”, Rec. G.650, Abril, 1997.
- [2] White Paper, “Optical Time-Domain Reflectometry”, Tektronix, 2000.
- [3] Gerd Keiser, “Optical fiber communications”, McGraw-Hill, Nova Iorque, 1983.
- [4] White Paper, “Usando um Refletômetro Óptico (OTDR) para Diagnosticar Falhas na Rede Óptica”, Hewlett-Packard, Brasil, 1999.
- [5] Revista de Telecomunicações Brasileiras, “Especificação funcional e por desempenho de reflectômetro óptico monomodo”, Prática 235-700-725, Maio, 1994.
- [6] J. Laferrière, R. Taws e S. Wolszczak, “Guide to fiber optic measurements”, Wavetek, França, 1998.
- [7] Dennis Derickson, “Fiber Optic-Test and Measurement”, Prentice-Hall, New Jersey, 1998.
- [8] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, John Wiley & Sons, 2ª Ed., Nova Iorque, 1997.
- [9] M. J. Adams, “An Introduction to Optical Waveguides”, Wiley, Nova Iorque, 1981.
- [10] S. J. Fielding & R. P. Dave, “Experience with Field Measurements of Optical Fiber Bandwidth and Development of an Automated Method”, Digest, 1981.
- [11] White paper, “Introduction to WDM Testing”, EXFO, Ref. WDM guide 1AN, Setembro, 1997.
- [12] G. J. Foschini e C.D. Pole, “Statistical theory of polarization dispersion in singlemode fibers”, Journal of Lightwave Technology, LT-9, 1991.
- [13] Electronic Industries Association (EIA), “Chromatic dispersion measurement of optical fibers by the phase shift method”, IEC 793-1-C5A, 1987.
- [14] Telecommunications Industry Association (TIA), “Chromatic dispersion measurement of singlemode optical fibers by spectral group delay in the time domain”, EIA/TIA FOTP-168, Washington, DC, 1992.
- [15] N. Gisin e J.P. Pellaux, “Polarization mode dispersion: time versus frequency domains”, Optics Communications, vol. 89, pp. 316-323, 1992.
- [16] White paper, “Guideline for the calculation of PMD in fibre optic systems”, IEC, Technical Report, Ref. 61282-3.
- [17] Telecommunications Industry Association (TIA), “Polarization-mode dispersion measurement for singlemode optical fibers by Jones matrix eigenanalysis”, EIA/TIA FOTP-122, Washington, DC, 1996.
- [18] T. E. Darcy e C. D. Pole, “Polarization-induced performance variables”, Communications Engineering and Design, 1992.
- [19] White paper, “Lightwave Test and Measurement, Measurement Tutorials”, Agilent Technologies, Ref. 5968-8000E, Fevereiro de 2000.
- [20] White paper, “How to Make Accurate Fibre Optic Power Measurements”, Hewlett Packard, Application Note 1034, Dezembro, 1987.
- [21] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable”, Recomendação G.653, Abril, 1997.

- [22] W.V. Sorin e D.M. Baney, “Measurement of Rayleigh Backscatter at 1.550 nm with 32 μm Spatial Resolution”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, nº 4, pp. 374-376, Abril, 1992.
- [23] S.E. Miller e I.P. Kaminow, “Optical Fiber Communications II”, Academic Press, p. 467, 1988.
- [24] F. P. Kapron, B. P. Adams, E. A. Thomas e J. W. Peters, “Fiber-optic reflection measurement using OCWR and OTDR techniques”, Journal of Lightwave Technology, , Nova Yorque, 1993.
- [25] H. Chou and W. Sorin, “High-Resolution and High-Sensitivity Optical Reflection Measurements Using White-Light Interferometry”, Hewlett-Packard, Journal, vol. 44, no. 1, pp. 52-58, Fevereiro, 1993.
- [26] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of a single-mode optical fibre cable”, Rec. G.652, 2000.
- [27] Cabelte, SA, Unidade de cabos e fibra óptica, Single mode fiber-Unshifted Chromatic Dispersion, registo de ensaio, Maio, 2006.
- [28] Cabelte, SA, Unidade de cabos e fibra óptica, Single mode fiber-Shifted Chromatic Dispersion, registo de ensaio, Maio, 2006.
- [29] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy”, Rec. G.957, 1995.

Capítulo 5

Caracterização de uma rede óptica em operação

A optimização das redes ópticas em operação, que se consubstancia na procura das soluções tecnológicas, em resposta ao incessante crescimento da largura de banda está intimamente relacionada com as medições e a manutenção dos dados oriundos dessas medições por forma a facilitar o processo designado de (re)engenharia de sistemas [20-23].

A caracterização da rede óptica que nos propomos realizar ao longo deste capítulo, servirá de base a modelização a realizar no capítulo 6, representada na Figura 6-1, pelo que a organização das secções deste capítulo foi feita de forma a facilitar a leitura dos dados daí provenientes.

Assim, o objectivo principal das duas primeiras secções é o da comparação dos dados recolhidos em medições realizadas em 1996, com medições realizadas em 2006 em determinadas secções da rede óptica, de forma a serem passíveis de retirar conclusões quanto às condições de envelhecimento dos principais parâmetros da rede. Os valores apresentados nestas secções correspondem a medições realizadas por laboratórios credenciados, no âmbito da certificação da infra-estrutura.

A comparação dos dados das medições realizadas em alturas diferentes permite-nos ainda ter uma melhor perspectiva da evolução desses parâmetros. Avaliam-se ainda os efeitos negativos que as reflexões nos conectores e outros elementos discretos provocam nas redes ópticas.

Na terceira e quarta secção, apresentam-se trabalhos baseados em medições de campo realizadas pelo autor, no âmbito desta tese, onde se caracterizam os efeitos da PMD e da FWM.

Por último faz-se um breve resumo das principais conclusões a retirar do estudo realizado.

5.1 Avaliação das perdas de inserção e de retorno, reflectâncias discretas e reflectometria óptica

Na avaliação a produzir nesta secção, usamos um critério diferente do notado em 4.1.1, para as perdas de inserção, designado de perdas toleráveis, não incluindo inicialmente qualquer margem de implementação, obtendo-se dessa forma o valor de perdas efectivas num percurso óptico, que corresponde a um dos critérios de aceitação da instalação dos cabos de fibras ópticas.

As perdas toleráveis (conforme a equação 4-8) têm em conta os valores nominais de perdas de todos os elementos discretos nesse percurso óptico, ou seja; o valor do coeficiente de atenuação das fibras e das perdas nos conectores (dados dos fabricantes), e o valor médio (ou esperado) de perdas em juntas em função do comprimento de onda.

A medição teve por base os critérios definidos na norma EN/IEC 60793-1-40 (B) [9], para os comprimentos de onda: 1310 e 1550 nm. Todas as fibras, são medidas nos dois comprimentos de onda e em ambos os sentidos (de A > B(N) e de (N)B > A) sendo o resultado final, para cada comprimento de onda, a média dos valores medidos nos dois sentidos, como exemplifica a Figura 5-1. O procedimento de calibração da potência transmitida tem por base a norma IEC 793-1-C4 [10], ou EN/IEC 60793-1-40 (D) [11].

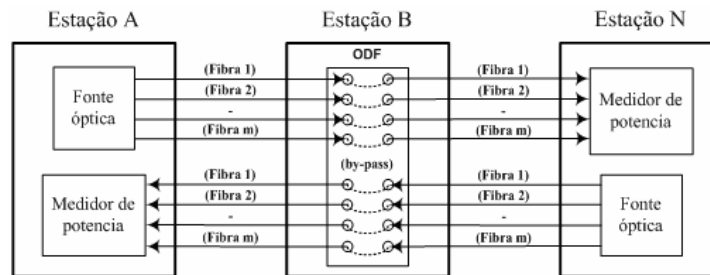


Figura 5-1: Ligação típica de circuitos ópticos ponto-a-ponto onde poderão existir até N-1 estações intermédias num determinado caminho óptico.

Alguns dos valores típicos usados comumente nas perdas de inserção em componentes discretos e em fibras monomodo são:

- $A_{\text{fibra SMF}} = 0,44 \text{ dB/km (1310 nm); } 0,25 \text{ dB/km (1550 nm)}$.
- $A_{\text{fibra DSF}} = 0,45 \text{ dB/km (1310 nm); } 0,25 \text{ dB/km (1550 nm)}$.
- $A_{\text{junta}} (\text{valor bidireccional}) = 0,1 \text{ dB}$.

- $A_{\text{conector}} = 0,5 \text{ dB}$.
- $A_{\text{cordões, ópticos}} = 1 \text{ dB}$.

Os valores de perdas de inserção, medidos após a instalação dos cabos de fibra óptica em 1996, numa secção da rede com cerca de 54 km, são os que se mostram na Tabela 5-1, em termos dos seus valores médios (valores esperados e efectivamente medidos).

Ligação	L (km)	Valores médios (esperados) [dB]		Valores médios (medidos) [dB]	
		1310 nm	1550 nm	1310 nm	1550 nm
A>>>B	9,74	4,28	2,43	4,28	2,53
B>>>C	12,48	5,49	3,12	5,99	3,24
C>>>D	0,20	0,09	0,05	0,09	0,05
D>>>E	16,85	7,41	4,21	7,08	4,04
E>>>F	14,50	6,38	3,63	6,09	3,34
TOTAIS	53,77	23,65	13,44	23,53	13,21
Desvio padrão				0,52	0,36
α (dB/km)		0,44	0,25	0,44	0,25

Tabela 5-1: Tabela resumo dos valores médios das perdas de inserção medidos em 1996 numa secção da rede óptica em operação (fibras norma G.653 [2] da ITU-T).

O percurso óptico da Tabela 5-1, corresponde à modelização da secção da rede óptica a otimizar no capítulo 6, e representa um cenário de implementação do nível hierárquico STM-64, por exemplo, onde são usadas duas fibras, com retorno na estação F, e a direito as fibras nas estações intermédias, numa extensão total de cerca de 107 km.

O valor médio do comprimento medido em 1550 nm (Tabela 5-1) deve ser multiplicado por dois para se obter o comprimento total de 107 km e somar a contribuição das diversas conectorizações nas estações intermédias e das perdas no retorno na última estação (o que perfaz 9 dB). O valor total das perdas de inserção do caminho óptico, A_{total} é, $A_{\text{total}} = (2 \times 13,21) + 9 = 35,42 \text{ dB}$.

O passo seguinte é comparar os valores medidos na rede com os especificados nas recomendações da ITU-T, nomeadamente a G.957 [3] e a G.691 [2]. Conforme a Tabela 5D/G.691 [2] para a aplicação V-64.3 (implementação do nível hierárquico STM-64 nas fibras DSF) a atenuação no percurso óptico com uma extensão de 120 km, pode assumir valores entre 22 e 33 dB, numa janela de comprimentos de onda entre 1530 e 1565 nm.

O valor especificado de potência, máximo e mínimo do emissor, no ponto de referência S, recomendação G.957 [3] da ITU-T, é: $P_{\text{tx,max}} = +13 \text{ dBm}$ e $P_{\text{tx,min}} = +10 \text{ dBm}$, respectivamente. O valor mínimo de sensibilidade do receptor óptico (P_{rx}) no ponto de referência R, na mesma

recomendação da ITU-T, é de -24 dBm, para uma taxa de erros de 10^{-12} . Na determinação do valor de perdas toleráveis e fazendo directamente $A_{\text{tol}} = P_{\text{tx}} - P_{\text{rx}}$ (em dB), podemos encontrar o melhor e pior caso em termos de perdas no caminho óptico, não considerando a amplificação do sinal, consoante se trabalhe com um nível de potência mais ou menos elevado, respectivamente:

- Melhor caso de $A_{\text{tol}} = +13 \text{ dBm} - (-24 \text{ dBm}) = 37 \text{ dB}$.
- Pior caso de $A_{\text{tol}} = +10 \text{ dBm} - (-24 \text{ dBm}) = 34 \text{ dB}$

Comparando o melhor e o pior caso de A_{tol} com o valor de perdas totais de inserção ($\sim 34,5 \text{ dB}$), obtém-se uma margem de +2,5 dB para o melhor caso e de -0,5 dB para o pior caso, garantindo-se no primeiro destes a margem de 1 dB de penalidade recomendada pela Tabela 5D/G.691 [2].

No entanto, para garantir uma maior margem de implementação, normalmente da ordem dos 6 dB, é recomendável baixar a atenuação das conectorizações intermédias, mudando o tipo de conectores, ou usar amplificação óptica. A rede óptica está actualmente equipada com conectores FC/PC, se mudados por conectores do tipo FC/APC garantem-se melhores valores de perdas de inserção e de retorno, como adiante se mostra.

Numa medição de campo realizada durante o mês de Janeiro de 2006, realizada no âmbito da certificação da rede, após a instalação de uma nova junta óptica por fusão, procedeu-se a um conjunto de verificações numa secção da rede óptica, correspondente às estações anteriormente identificadas como E e F (da Tabela 5-1), com um comprimento total de 14,5 km.

Nestas últimas medições avaliaram-se com OTDR, as perdas e reflectâncias em elementos discretos, nos comprimentos de onda 1310 e 1550 nm. O procedimento usado está de acordo com a norma EN/IEC 60793-1-40 (C) [12]. Os valores observados a 1550 nm na fibra 1 (com retorno pela fibra 2, na estação F) podem ser verificados na Figura 5-2 (curva de retro dispersão unidireccional, vista da estação E).

Na Figura 5-2 estão assinalados um conjunto de eventos marcados de “1” a “9”, relativamente à fibra 1, que correspondem a juntas por fusão (eventos; “3” e “4” para a fibra 1 e no retorno pela fibra 2, assinalados com “8”, “7” e “6”) e de reflexões em conectorizações (eventos; “1”, “5” e “9”). A reflexão marcada como evento “5” corresponde ao retorno das fibras 1-2 na estação F. O evento marcado com “2” não corresponde a uma junta óptica, trata-se de uma perturbação local do índice de refração da fibra, considerada como perda não reflectiva pelo OTDR. Relativamente aos eventos vistos pela fibra 2 a análise é em tudo semelhante, pelo que seria redundante o seu comentário.

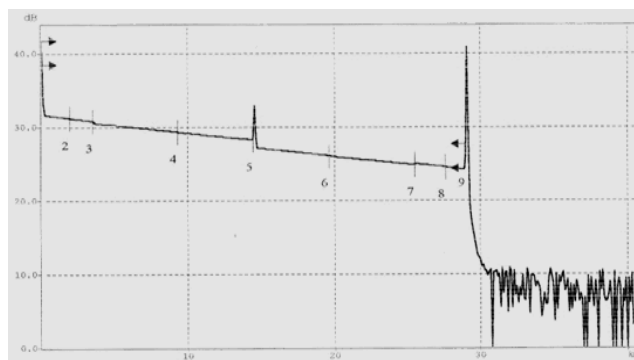


Figura 5-2: Curva unidireccional de reflectometria vista da fibra 1 (na estação E), com retorno pela fibra 2 (na estação F).

Os eventos relativos a juntas por fusão não assinalados nas curvas unidireccionais, têm valores de perdas inferiores à sensibilidade do OTDR. No caso presente a resolução de leitura do OTDR é de 0,001 dB. Na tabela 5-2 resumem-se os valores das perdas bidireccionais (em dB), vistas da estação E. As juntas não lidas no traço do OTDR por terem valores inferiores a resolução de leitura do equipamento deverão ser consideradas, no “pior caso”, como tendo perdas dessa ordem de grandeza. Da análise dos dados inscritos na Tabela 5-2 verifica-se que as fibras avaliadas cumprem com o objectivo de 0,1 dB de perdas bidireccionais.

	1ª Junta			2ª Junta			3ª Junta		
Posição (km)	1,4	27,7		3,5	25,5		9,3	19,6	
Nº FO	>>>	<<<	Média	>>>	<<<	Média	>>>	<<<	Média
1	0,001	0,032	0,017	0,251	-0,187	0,064	0,050	0,078	0,064
2	0,067	0,075	0,071	0,275	-0,167	0,108	0,074	0,079	0,077

Tabela 5-2: Tabela resumo das perdas bidireccionais em juntas ópticas (valores em dB).

A notação “-“ no retorno das fibras 1 e 2, na 2ª junta, não significa um ganho de potência uma vez que uma junta óptica traduz-se sempre em alguma atenuação do sinal. Este fenómeno, é devido a diferença do nível do retro espalhamento da luz antes e após a fusão. Se o nível do retro espalhamento da luz após a fusão, for de nível superior ao da fibra, antes e na própria fusão, essa diferença origina o efeito de um “ganho” no traço do OTDR, evento “7” da Figura 5-2, por exemplo. O traço de OTDR no sentido oposto, exibirá uma perda exagerada na mesma junta, evento “3” na mesma figura, pelo efeito contrário ao descrito anteriormente. Assim, a média dos dois traços de OTDR resultará na perda verdadeira da junta.

O objectivo enunciado anteriormente de 0,1 dB de perdas bidireccionais nas juntas por fusão, acomoda desvios até 1% no total de todas as fibras e de todos os cabos instalados, o que significa que é tolerável no conjunto de todas as juntas que uma determina quantidade não cumpra com esse objectivo.

Dentro das medições de campo a avaliação das reflexões é outro fenómeno que deve ser verificado com regularidade.

Em termos de perdas de retorno e de reflectâncias discretas entre os pontos S e R, as recomendações da ITU-T, G.957 [3] (Tabela 4/G.957) para a aplicação L-16.3, e G.691 [2] (Tabela 5D/G.691) para a aplicação V.64.3, especificam um valor mínimo de ORL = 24 dB e de -27 dB como valor máximo de reflectâncias discretas. Estes valores tendem a minimizar os efeitos de reflexões múltiplas (do ruído interferométrico, por exemplo) e assegurar níveis de penalidades aceitáveis devido aos efeitos das reflexões, especialmente nas configurações de sistemas (ou ligações ópticas) onde existam múltiplas conectorizações, que é o caso da rede óptica em avaliação [24,25].

Na Figura 5-2 são visíveis reflectâncias discretas devidas a conectorizações. Esses valores têm uma magnitude considerável, uma vez que vão desde os -18 a -43 dB, tendo contudo, leituras diferentes. Assim, no primeiro caso, para o evento no início do traço (reflectância de -33,3 dB), esse valor está afectado pela zona morta de evento do OTDR, pelo que não é totalmente fiável. No segundo caso (evento “5”, com um valor de -43,0 dB), corresponde ao valor de reflectância esperado, usando-se conectorizações do tipo FC/PC. Por último, no terceiro caso (evento “9”), o valor medido de -18,4 dB, corresponde a valores esperados de reflexões devidas a conectores FC/PC desligados.

Ainda relativamente à medição das perdas de retorno, numa medição após instalação realizada em Junho de 2004, num outro ponto da rede distante do anteriormente analisado, avaliaram-se as perdas de retorno e as reflectâncias discretas. Esta parte da rede óptica agora avaliada dista da anterior cerca de 60 km, relativamente as estações mais próximas e têm a configuração que a Figura 5-3 mostra. O procedimento usado na medição está de acordo com a norma EN/IEC 61300-3-6 (P:4.1) [13], nos comprimentos de onda; 1310 e 1550 nm.

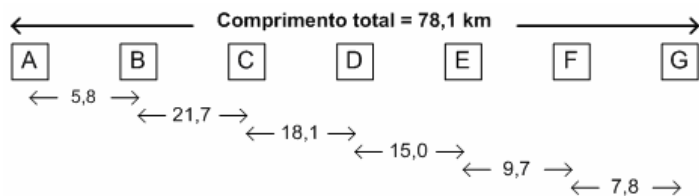


Figura 5-3: Disposição da secção da rede óptica avaliada quanto aos níveis de ORL e das reflectâncias discretas.

Nesta secção da rede óptica agora em avaliação todas as conectorizações são do tipo FC/APC, com a excepção da estação A, onde se usam conectores do tipo FC/PC.

A Figura 5-4 mostra a curva unidireccional vista da fibra 7 (com retorno pela fibra 8), correspondente a ligação entre as estações C e A com retorno nesta última, com as fibras a direito na estação B. As estações B e C têm terminações do tipo FC/APC, enquanto a estação A está equipada com conectorizações do tipo FC/PC, como já referido.

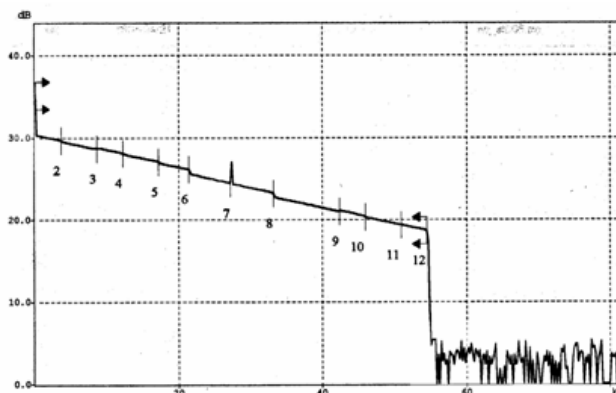


Figura 5-4: Curva unidireccional vista pela fibra 7 com retorno pela fibra 8.

Contrariamente à situação anterior quando se avaliaram as terminações do tipo FC/PC (Figura 5-2), as reflectâncias observáveis na Figura 5-4, não exibem grandes disparidades, com a excepção do evento assinalado como “7”, as quais se relacionam com conectorizações do tipo FC/PC (da Estação A). Em particular, a reflexão de fim de fibra apresenta um valor de -66,8 dB, que é cerca de 47 dB abaixo do valor de reflexão fim de fibra das conectorizações do tipo FC/PC.

Os valores de reflexões discretas, característicos dos conectores FC/APC, além de garantir que a operação do laser não é afectada e de minimizar o efeito das reflexões múltiplas, previne ainda a protecção da vista, aspecto importante na manutenção dos sistemas de comunicação ópticos [11].

Evento	Figura	Reflectância Discreta (dB)	Tipo de evento	Tipo de conector
5	5-2	-43,0	Fibra a direito	FC/PC
9	5-2	-18,4	Fim de fibra	FC/PC
6	5-4	-65,4	Fibra a direito	FC/APC
7	5-4	-43,9	Fibra a direito	FC/PC
8	5-4	-71,1	Fibra a direito	FC/APC
12	5-4	-66,8	Fim de fibra	FC/PC

Tabela 5-3: Tabela resumo dos valores de reflectâncias discretas.

Na Tabela 5-3 resumem-se os valores das reflectâncias discretas avaliadas anteriormente nos traços de OTDR (curvas unidireccionais) em termos dos valores médios, não relevando o primeiro evento para cada traço do OTDR visto corresponderem a valores interferidos, no acoplamento com

o OTDR. Como já referido, os valores inscritos na Tabela 5-3 revelam um desempenho superior das conectorizações FC/APC comparativamente com as do tipo FC/PC, o que era esperado.

5.2 Avaliação da dispersão cromática

A avaliação da dispersão cromática a realizar nesta secção visa essencialmente verificar o grau de envelhecimento das fibras, pela comparação dos dados anteriormente medidos em 1996 e, os obtidos mais recentemente, nas medições de campo realizadas em Janeiro de 2006, referidas em 5.1.

A dispersão cromática foi medida no percurso óptico da Figura 5-5, constituído pela concatenação de três secções de cabos, com um comprimento total de 29 km, e usa a fibra 1, de ida, com retorno pela fibra 2, na estação B. As secções concatenadas são constituídas por 32 fibras monomodo de dispersão deslocada, com um índice de refração (IOR) de 1,4718 e de 1,4711, em 1310 e 1550 nm, respectivamente, conforme expresso em [16].

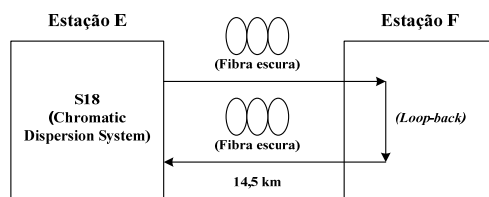


Figura 5-5: Configuração de teste usada na medição da dispersão cromática.

O equipamento de teste usado na medição foi o S18 (Chromatic Dispersion System) do fabricante York Technology, que permite o rastreio manual do desvio de fase relativo, sobre um intervalo de comprimentos de onda seleccionáveis.

A medição da dispersão cromática na rede óptica foi realizada conforme as normas EN/IEC 607930-1-42 (C) [14] e EIA/TIA FOTP-169 (antiga norma: IEC 793-1-C5A) [7] nos seguintes intervalos de comprimentos de onda (com incrementos de 5 nm):

- Segunda janela óptica; entre 1250 e 1350 nm.
- Na terceira janela óptica; entre 1500 e 1600 nm.

A Figura 5-6 mostra em forma de gráfico os dados recolhidos na medição, apenas para as fibras 1 e 2, com retorno por esta última, na estação F.

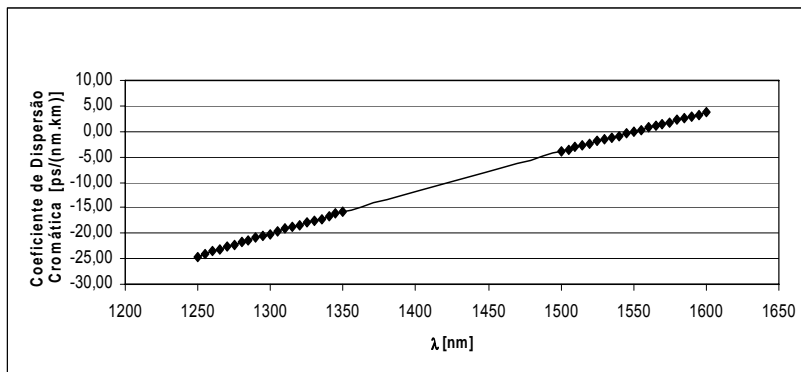


Figura 5-6: Perfil da dispersão cromática das fibras 1-2. Os quadrados a cheio representam comprimentos de onda medidos, os restantes valores foram obtidos por extrapolação.

Os valores do comprimento de onda de dispersão nula, λ_0 , e da inclinação da dispersão, S_0 , correspondentes a 1550,82 nm e 0,07586 ps/nm².km, foram lidos directamente no equipamento de medida.

A recomendação G.653 [1] da ITU-T especifica os seguintes valores para fibras cabladas:

- Dispersão cromática: $\leq 3,5$ ps/nm.km em 1550 nm e ≥ -25 ps/nm.km em 1310 nm.
- Inclinação de dispersão nula, $S_0 \leq 0,085$ ps/nm².km.
- Comprimento de onda de dispersão nula ≥ 1535 e ≤ 1565 nm.

Confrontando os valores obtidos na medição com a recomendação G.653 [1] da ITU-T, verifica-se que nos intervalos de comprimentos de onda avaliados, a fibra óptica em teste cumpre com os requisitos especificados.

Por sua vez, na Tabela 5-4 comparam-se os valores actuais com os valores da dispersão medidos anteriormente, em 1996, após instalação dos cabos. Esta comparação restringe-se ao coeficiente de dispersão cromática (D) nos comprimentos de onda: 1310 e 1550 nm, e aos valores de λ_0 , e de S_0 .

Critério	Unidades	λ (nm)	Valores medidos	
			Actuais	Anteriores
D	ps/km.nm	1310	-19,15	-19,11
D	ps/km.nm	1550	0,06	-0,02
λ_0	nm		1550,82	1550,21
S_0	ps/nm ² .km		0,07586	0,07476

Tabela 5-4: Comparação dos valores medidos anteriormente há cerca de 10 anos e os actuais.

Analisando os dados da Tabela 5-4 verifica-se que as fibras não evidenciam sinais de envelhecimento, sendo contudo de assinalar valores discrepantes entre medições [16]. Muito embora

não seja possível, pela simples análise dos dados constante na tabela, correlacionar a variação dos parâmetros com a temperatura, por exemplo, trabalhos foram publicados onde se desenvolvem algoritmos para prever essa dependência [27-29], razão pela qual na secção 5.4, voltaremos a este assunto, preliminarmente à avaliação do efeito FWM.

5.3 Avaliação da PMD

A PMD constitui-se actualmente como uma potencial limitação na implementação de sistemas de transmissão de altos ritmos e longas distâncias devido a sua dependência quadrática da taxa de bits a transmitir (da equação 2-10). Por outro lado, dada a sua natureza estatística, a PMD varia no tempo e/ou com circunstâncias ambientais, as quais são difíceis de controlar [4-6,21]. Consequentemente é essencial dedicar atenção a sua medição, de forma a conseguir-se uma melhor compreensão do seu comportamento.

Com essa intenção, e no âmbito desta tese, foi feita a avaliação da PMD no tempo e com a variação da temperatura, num período compreendido entre 25 de Maio a 3 de Junho de 2005. Os resultados das medições de campo foram reportadas em [17].

A secção da rede óptica caracterizada nessa avaliação é a que se encontra inscrita na Tabela 5-1. A avaliação foi feita em duas etapas. Inicialmente foi criada uma ligação de teste com 19,4 km entre as estações A e B (com retorno nesta última). Essa ligação foi mais tarde expandida com a concatenação de mais fibras entre as estações B e C, somando um comprimento total de 67,8 km. O intervalo entre amostras foi de sensivelmente uma hora.

O equipamento usado nas medidas foi o analisador de PMD (UBI_PMD) do fabricante Photonetics, especificado com uma gama dinâmica de 65 dB e cuja fonte óptica disponibiliza uma potência de -18 dBm nas duas janelas ópticas (1310 e 1550 nm). A norma usada na medição foi a IEC TS 61941:2000 (Método C) [15].

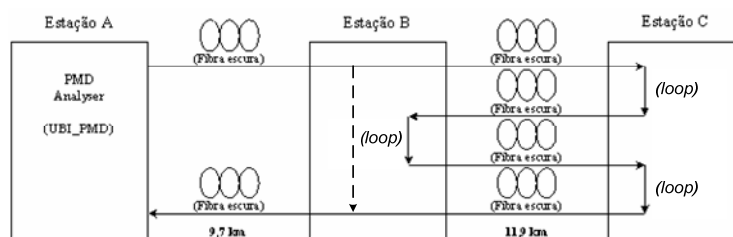


Figura 5-7: Configuração dos caminhos ópticos usados na medição da PMD: de teste entre as estações “A” e “B” e concatenado entre as estações “A” e “C”.

A PMD foi medida nos dois percursos ópticos (o de teste e o concatenado) numa configuração com retorno na última estação e terminação na estação A, onde se encontrava localizado o equipamento de medida. A configuração dos dois caminhos ópticos é o que a Figura 5-7 mostra.

Esses caminhos ópticos têm a seguinte disposição: ligação de teste com um comprimento total de 19,4 km, com retorno na estação B (seta a tracejado na figura) e usa as fibras identificadas como: 01 (ida) e 02 (volta). Na ligação concatenada com um comprimento total de 67,8 km, usou-se a fibra 01 (ida), com retorno na Estação C para a B, pela fibra 02 (com a fibra 01 a direito na estação B), com retorno na estação B para a C, pela fibra 03 e, finalmente com retorno à estação A pela fibra 04 (volta), com esta fibra a direito na Estação “B”.

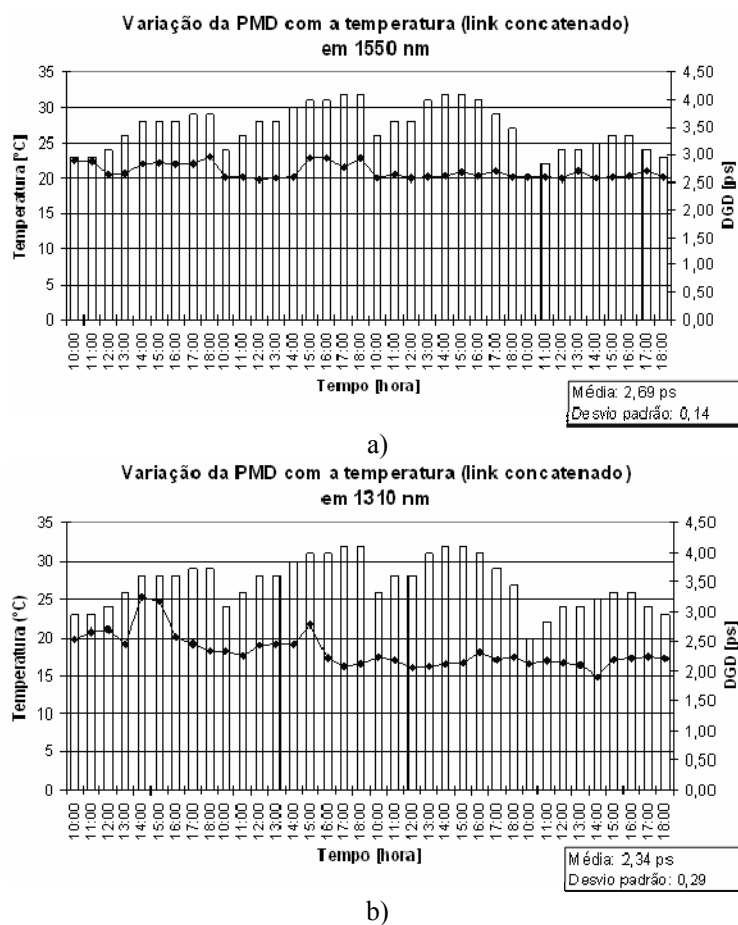


Figura 5-8: Variação da PMD obtida durante os quatros dias de medição no caminho óptico concatenado; em a) a 1550 nm e em b) a 1310 nm. A variação da temperatura ocorrida durante o período amostral é indicada pelas barras verticais.

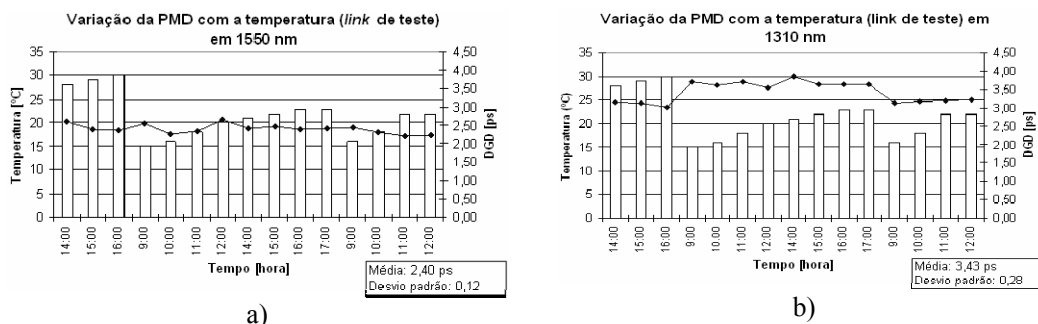


Figura 5-9: Variação da PMD obtida durante os três dias de medição no caminho óptico de teste; em a) a 1550 nm e em b) a 1310 nm. A variação da temperatura ocorrida durante o período amostral é indicada pelas barras verticais.

O número de amostras recolhidas nas medições e o valor do atraso diferencial de grupo (DGD) é o que mostra nos gráficos das Figuras 5-8 e 5-9, para os caminhos ópticos concatenado e de teste (nos comprimentos de onda; 1550 e 1310 nm), respectivamente.

Da observação dos gráficos das Figuras 5-8 e 5-9 verifica-se a existência de um comportamento “normalizado” da PMD, observado no seu pequeno desvio padrão. De notar ainda, que a variação ondulatória no tempo, do comportamento da PMD, não segue consistentemente a oscilação da variação da temperatura [17].

Não obstante o período dedicado às medições devesse ter sido mais alargado, de forma a poderem ser tiradas conclusões mais definitivas, o comportamento da PMD deverá estar relacionado com o seguinte [17]:

- Os cabos de fibras ópticas encontram-se instalados a pelo menos um metro de profundidade, o que deverá constituir uma limitação a variações de temperatura mais bruscas.
- As terminações dos cabos de fibras ópticas encontram-se no interior de armários arrefecidos.
- O fornecedor da fibra óptica foi o mesmo para todos os cabos instalados. Significa isto, que com uma grande probabilidade as características geométricas das fibras combinem com maior perfeição do que nas situações onde este fornecedor difere.

Ainda da análise dos dados das Figuras 5-8 e 5-9, obtém-se um valor médio do atraso da PMD de 2,4 ps para o caminho óptico de teste e de 2,69 ps para o caminho óptico concatenado, em 1550 nm, que correspondem a coeficientes da PMD (D_{PMD}), de 0,545 e 0,327 ps/km^{1/2}, respectivamente.

Confrontando esses valores com os requisitos de implementação das hierarquias STM-N, nomeadamente quanto à rec. G.783 [8] da ITU-T, é possível estabelecer um compromisso teórico, caso a caso. Assim, com recurso à equação (2-10) e, para efeito de comparação, é possível estimar a distância máxima (L_{\max}) alcançável na implementação dos níveis hierárquicos (SDH), em função dos valores medidos da PMD (em sistemas não compensados).

Esses valores resumem-se na Tabela 5-6 (D_{PMD} em 1550 nm), 1º caso (caminho de teste) e 2º caso (caminho concatenado), respectivamente. Pela análise dos dados da Tabela 5-6 e, meramente de um ponto de vista teórico, é possível considerar, apenas pelo critério da PMD, a implementação do nível hierárquico STM-16, em ambas as situações.

SDH	Bit rate (Mb/s)	L_{\max} (km)	
		1º caso	2º caso
STM-1	155,52	1180	1968
STM-4	622,08	295	492
STM-16	2.488,32	74	123
STM-64	9.953,28	18	31
STM-256	39.318,12	5	8

Tabela 5-5: Máximas distâncias (teóricas) alcançáveis na implementação dos níveis hierárquicos STM-N, em função da PMD (sistemas não compensados).

5.4 Avaliação do efeito FWM

Constituindo-se a FWM a maior limitação na implementação de sistemas multicanal, em fibras DSF [24-26], era de fundamental importância, no âmbito desta dissertação, um estudo mais aprofundado do fenómeno. Este estudo deu origem a dois trabalhos [18,19], que são a base da avaliação a produzir nesta secção.

Realizaram-se durante o mês de Abril de 2006, entre os dias 18 e 21, medições de campo numa secção da rede óptica compreendida entre as estações A e E (com retorno nesta última) conforme a configuração inscrita na Tabela 5-1, que visaram a avaliação do efeito FWM, pela transmissão de 4 canais multiplexados na mesma fibra.

O percurso óptico completo perfaz um comprimento ~78 km, usando as fibras; 13 (de ida) e 14 (de retorno). O intervalo amostral foi cerca de 6 min. A temperatura durante o período das medições variou entre os 21,1 °C e os 11,1 °C, com uma média de 15,47 °C, verificada na região de Lisboa, como o gráfico da Figura 5-10 mostra. Os dados recolhidos nas medições foram registados em forma de tabelas [18].

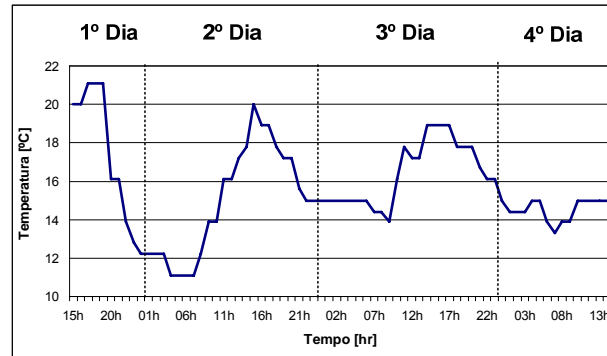


Figura 5-10: Variação da temperatura ao longo do tempo das medições.

A composição dos equipamentos usados na medição é o das Figuras 5-11 e 5-12, sendo constituída por um equipamento modular (OSICS) do fabricante NetTest. A saída dos lasers CW foi ligada a um conjunto de controladores de polarização, cuja função é alinhar a polarização dos lasers, de forma a maximizar a eficiência do processo FWM. O conjunto foi depois ligado a um WDM MUX (4×1) e a saída deste dispositivo, por sua vez, ligada à fibra 13. A fibra 14 (retorno) foi conectada a um OSA (*Optical Spectrum Analyzer*), e por via deste equipamento, a uma unidade de processamento de dados [27].

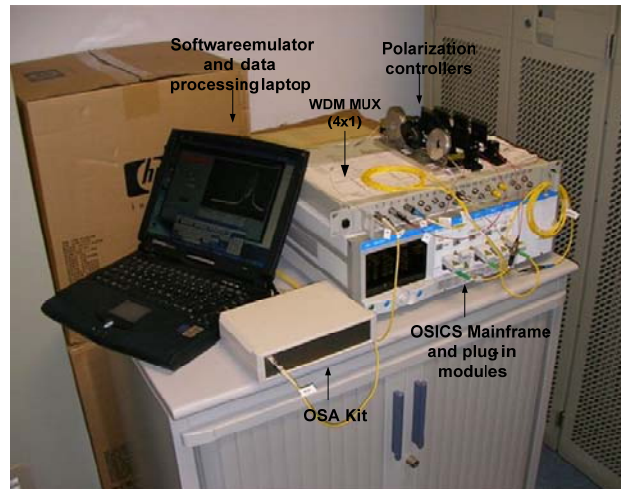


Figura 5-11: Disposição dos equipamentos de medida usados na avaliação do efeito FWM.

Na Figura 5-12 mostra-se o diagrama de blocos do sistema usado na medição da FWM e, resumem-se os parâmetros mais importantes dos emissores usados nos 4 canais originais; comprimento de onda (λ) e potência injectada na fibra (P_T), numa configuração CW (*Continuous-Wave*).

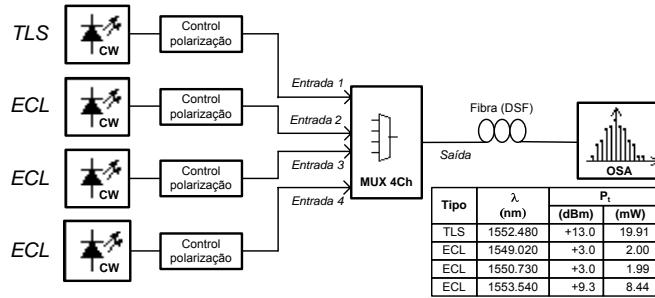


Figura 5-12: Diagrama de blocos relativo ao sistema de medição da FWM e principais parâmetros dos Lasers CW.

Paralelamente com a avaliação do efeito FWM, foi verificada a região do comprimento de onda de dispersão nula (λ_0). O valor encontrado com este procedimento representa o $\lambda_{0, \text{médio}}$, do conjunto de cabos (fibras) concatenados que formam o percurso óptico avaliado. Tomando como referência o valor de λ_0 observado em 1996 (1551,73 nm), e com centro neste, foi avaliado um intervalo de comprimentos de onda (± 6 nm), de forma a ser verificada a melhor relação da eficiência FWM, indicador da região de dispersão nula na fibra.

A composição dos equipamentos usados na avaliação é em tudo semelhante à do diagrama de blocos da Figura 5-12, com a excepção de apenas dois Lasers CW terem sido usados. O princípio da avaliação baseia-se na injeção na fibra de duas portadoras ópticas CW, designadas de canais bombagem e de prova, com potências de $\sim +8$ e $\sim +3,6$ dBm, respectivamente. A avaliação inicia-se, sintonizando o comprimento de onda de um dos canais, num comprimento de onda muito próximo da região (esperada) de dispersão nula. A Figura 5-13, mostra o espectro obtido, relativo à primeira medição. A temperatura ambiente verificada durante o período das medições foi de 15 °C.

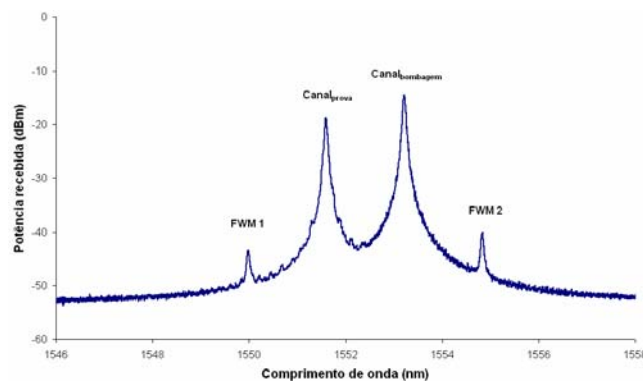


Figura 5-13: Espectro de comprimentos de onda obtido na primeira medição da avaliação do comprimento de onda de dispersão nula.

Os produtos FWM geradas pelo efeito FWM são, nesta situação, em número de dois, $2 \times \text{Canal}_{\text{bombagem}} - \text{Canal}_{\text{prova}}$ e $2 \times \text{Canal}_{\text{prova}} - \text{Canal}_{\text{bombagem}}$, conforme a equação (2-20), identificados como FWM 1 e 2, respectivamente, na Figura 5-13.

Por sua vez, na Figura 5-14, mostra-se a média dos valores de potência óptica recebida nos produtos FWM em função do comprimento de onda do canal de bombagem.

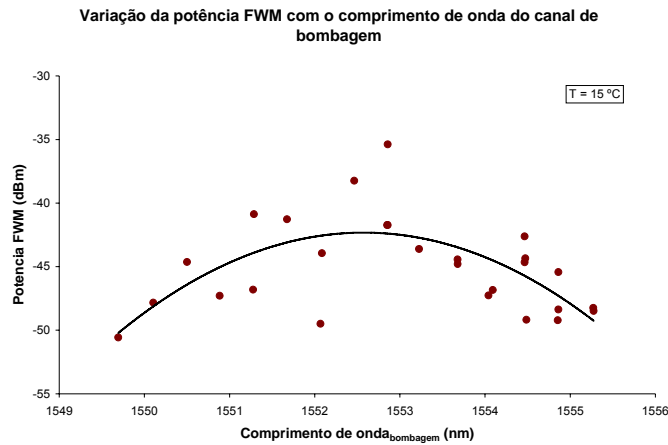


Figura 5-14: Dispersão e linha de tendência do valor médio da potência média recebida nos produtos FWM, em função da variação do comprimento de onda do canal de bombagem.

O gráfico da Figura 5-14 mostra que a eficiência FWM é maximizada quando o canal de bombagem tem um comprimento de onda muito próximo de 1552,858 nm (para uma temperatura ambiente de 15 °C), razão pela qual o valor de $\lambda_{0, \text{médio}}$ no percurso óptico avaliado se deverá situar muito próximo desse valor. Usando o algoritmo em [29], o correspondente valor de $S_{0, \text{médio}} = 0,0725 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}$. Esses valores médios (de λ_0 e de S_0) irão ser usados como referência na avaliação subsequente do efeito da FWM.

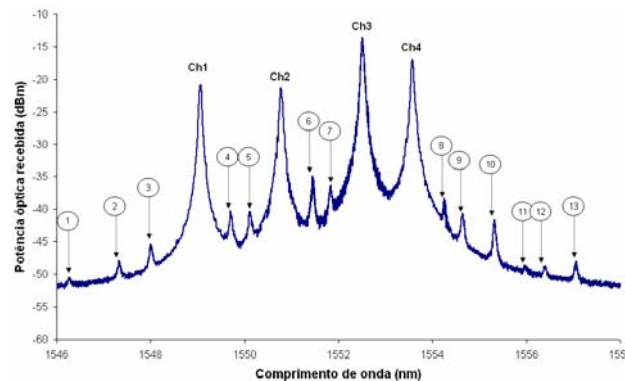


Figura 5-15: Espectro de comprimentos de onda obtido na primeira medição da avaliação do efeito FWM. A numeração aposta significa; ch1 a ch4, os canais originais e, um número dentro de um círculo, os produtos FWM mais significativos.

O primeiro passo na avaliação do efeito FWM consistiu em determinar os comprimentos de onda correspondentes aos produtos FWM. Na Figura 5-15 pode ser observado o espectro de comprimentos de onda relativo à primeira medição, onde se evidencia a presença de 13 produtos FWM mais significativos.

Na Figura 5-16, por sua vez, mostra-se o alinhamento e a combinação dos canais originais que originaram os produtos FWM. Estes podem ser determinados a partir da equação (2-20), na forma $v_{ijk} = v_i + v_j - v_k$ com $i, j \neq k$. Na situação avaliada, os produtos FWM gerados, serão pelo menos em número de 24 (da equação 2-24).

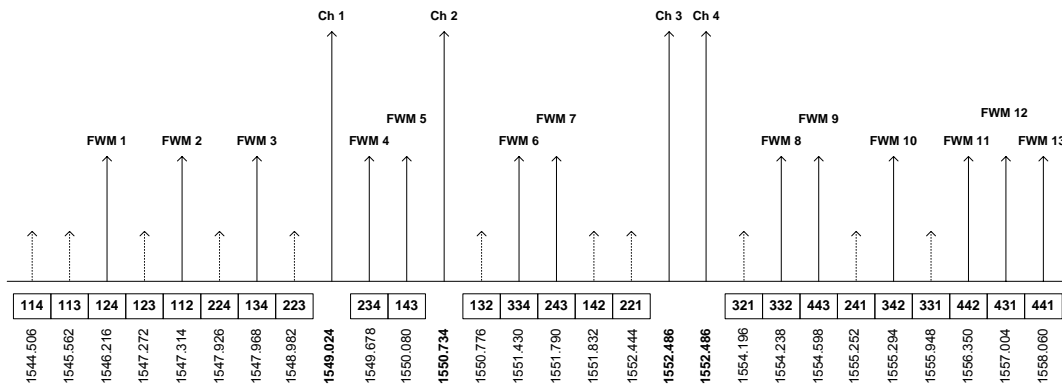


Figura 5-16: Alinhamento e combinação dos canais originais que originaram os produtos FWM relativamente ao espectro da Figura 5-16. Os produtos FWM a pontado na figura têm níveis de potência não perceptível pelo OSA.

Após os considerandos anteriores, podemos verificar a formação de dois produtos FWM, em duas situações distintas, com $i = j$ e, com $i \neq j$, por exemplo, os dois primeiros produtos FWM, da Figura 5-16, com o auxílio da equação (2-20) [18]:

$$\begin{aligned} \text{1ª Situação:} \quad \text{Produto 1} &= \text{Ch}_1 + \text{Ch}_2 - \text{Ch}_4 = \\ &= 1549,024 + 1550,734 - 1553,542 = 1546,216 \text{ com } i \neq j \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2ª Situação:} \quad \text{Produto 2} &= 2 \times \text{Ch}_1 - \text{Ch}_2 = \\ &= 1549,024 + 1549,024 - 1550,734 = 1547,314 \text{ com } i = j \end{aligned}$$

Comparando os espectros das Figura 5-16 e 2-19 verifica-se, que contrariamente quando se usam espaçamentos uniformes entre canais, na situação agora avaliada, os produtos FWM gerados não se sobrepõem no mesmo comprimento de onda dos canais originalmente injectados na fibra, provando ser esta técnica, da utilização de espaçamentos não uniformes entre canais, uma forma de viabilizar a transmissão de sistemas WDM nas fibras DSF, colocando todavia restrições ao seu planeamento dado o número elevado de produtos gerados.

Nas figuras seguintes e, em forma de gráficos, condensam-se os dados observados nas medições. Relativamente à Figura 5-17 o gráfico corresponde a variação do comprimento de onda dos canais originais e dos produtos FWM, observados ao longo do tempo da medição. As oscilações mais bruscas no comprimento de onda, observáveis na figura, são maioritariamente devidas ao processo (interno) de recalibração do sistema de aquisição dos dados.

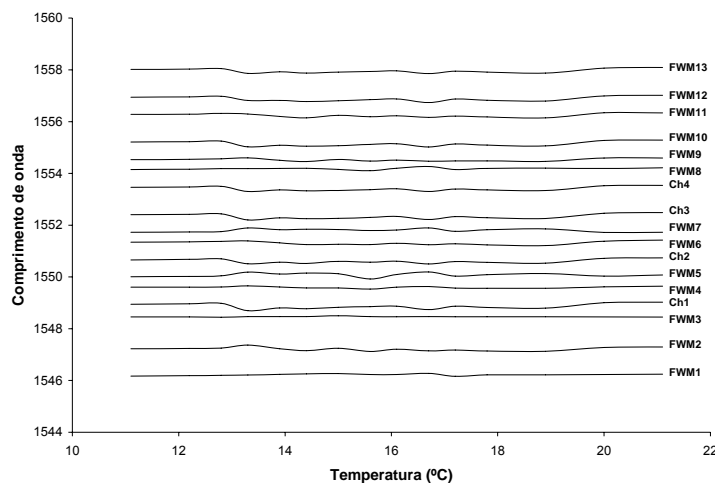


Figura 5-17: Valores medidos na rede óptica relativamente ao comprimento de onda nos canais originais e nos produtos FWM, em função da variação da temperatura.

Quanto à Figura 5-18, diferentemente da anterior, dado que a dispersão dos valores obtidos nas medições de potência são muito superiores as verificadas no comprimento de onda, com a exceção dos canais de bombagem, e como forma de facilitar a leitura dos dados, na figura mostra-se a tendência dos valores medidos com a variação da temperatura.

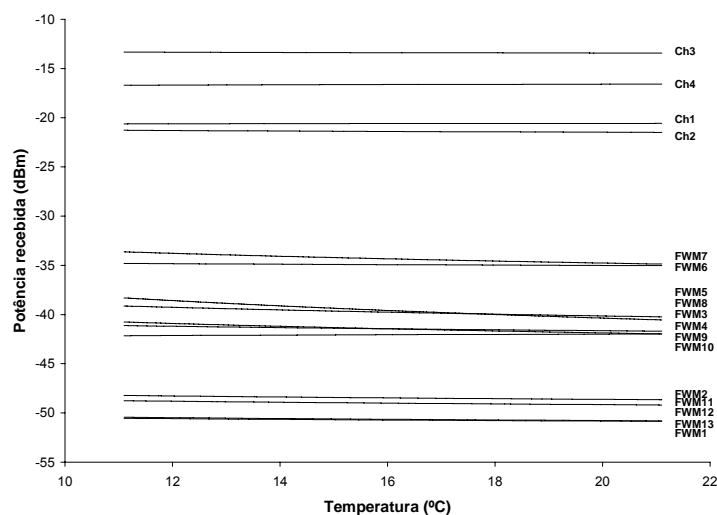


Figura 5-18: Linha de tendência da potência recebida nos canais originais e nos produtos FWM em função da variação da temperatura.

A partir dos dados das medições foram avaliados, a média e o desvio padrão, relativos ao comprimento de onda e à potência óptica recebida nos canais originais e nos produtos FWM. O desvio padrão dos comprimentos de onda dos produtos FWM foi de aproximadamente 16,6 pm. Considerando que o mesmo acontece com os canais originais, estas variações deverão ter origem em flutuações internas dos lasers.

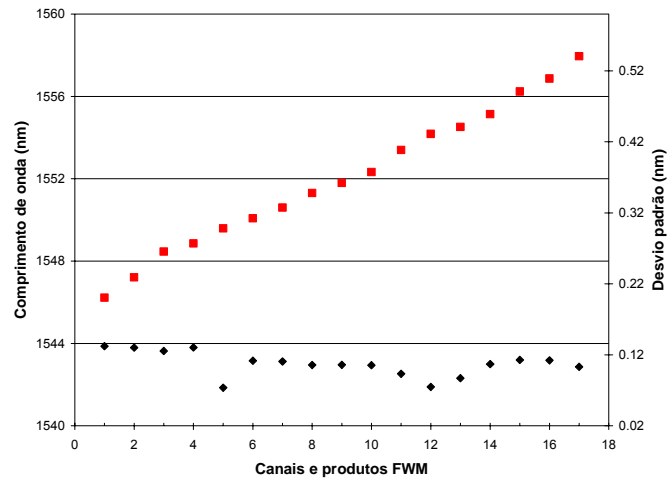


Figura 5-19: Valores médios e desvio padrão correspondentes ao comprimento de onda, verificados nos canais originais e nos produtos FWM.

As Figuras 5-19 e 5-20 mostram os valores médios e o desvio padrão correspondente a cada componente referido anteriormente, relativamente ao comprimento de onda, e à potência óptica recebida, respectivamente.

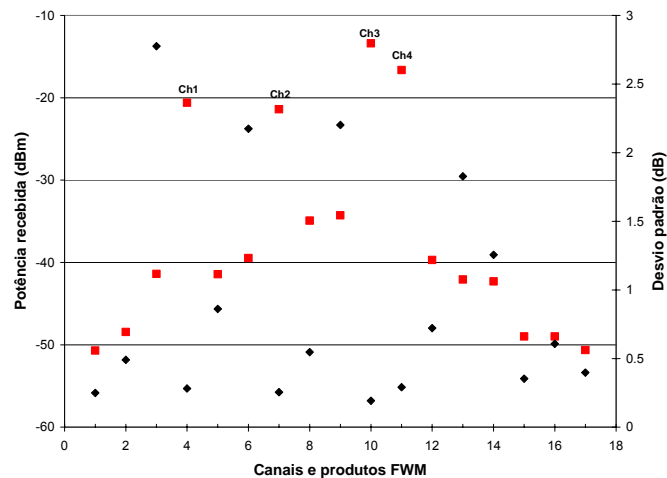


Figura 5-20: Valores médios e desvio padrão correspondentes a potência óptica recebida, nos canais originais e nos produtos FWM.

Pela observação dos dados na Figura 5-20, constata-se serem em média superiores, as variações da potência óptica recebida nos produtos FWM, que nos canais originais, particularmente nos produtos FWM localizados na proximidade destes. Pelo que adiante se estuda a variação da eficiência FWM em função da temperatura. Contudo, e uma vez que foram detectadas na secção 5.2 variações ao nível do comprimento de onda de dispersão nula, as quais confirmamos no início desta secção, de seguida estuda-se o correlacionamento desses dois efeitos, com as variações da temperatura exterior.

A avaliação inicia-se determinando a eficiência FWM, num dos produtos FWM (FWM 6, por exemplo), com recurso à (2-22). Os produtos de FWM são dependentes da potência dos sinais que lhe dão origem (ver secção 2.2.2.4), bem como da coerência de fase entre estes (ver equação (2-21)). Considerando o produto FWM 6 e os canais 2 e 3 que o originaram, pelos dados recolhidos nas medições, condensados na Figura 5-18, verifica-se existir uma variação de potência de: 0,39; 0,58 e de 1,1 dB, respectivamente no canal 3, 4 e nesse produto FWM.

Após determinada a eficiência FWM, no intervalo da variação da temperatura, esses dados são depois inseridos na equação (2-21), determinando-se dessa forma a variação de λ_0 , nesse produto FWM, igualmente em função da temperatura. Os dados obtidos são os que se mostram na Figura 5-21. Num passo intermédio, o valor do factor da discordância de fase (Δk) e do seno de $(\Delta k \cdot L/2)$ da equação (2-22) são obtidos por iteração.

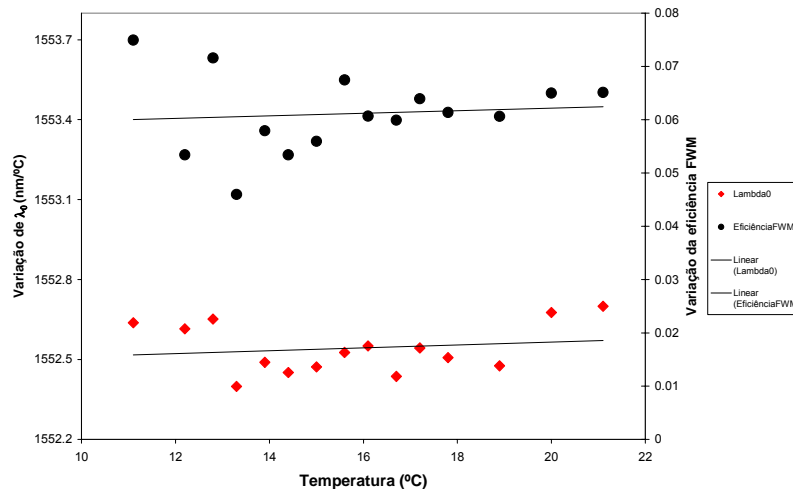


Figura 5-21: Variação e linha de tendência de λ_0 e da eficiência FWM, em função da temperatura.

Ajustando linearmente os dados da Figura 5-21, verifica-se ser 0,0054 nm/°C a variação de λ_0 , levando em conta a dispersão dos dados observados, os quais estão interferidos, por se tratarem de valores médios, e a recalibrações do sistema de medição. Esse valor é inferior ao observado em

[27], onde foi reportada uma variação linear de $\lambda_0 = 0,032 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ e, deverá ter origem nas diferentes condições da rede em que as medições foram realizadas.

Ou seja, no caso de estudo, e na realidade, a fibra óptica não foi sujeita directamente à variação da temperatura, dado estar instalada a uma profundidade média, não inferior a 1 metro e muito próxima ao gasoduto, onde o gás é transportada a uma temperatura relativamente constante, o que, como referido anteriormente relativamente à PMD, deverá condicionar alterações mais bruscas da temperatura.

Obtida a variação de λ_0 , nas condições anteriores, é igualmente possível determinar a razão da variação da dispersão em função da temperatura, usando os valores de; λ_0 , determinado no passo anterior e, o de S_0 , obtido anteriormente no início da secção, assumindo que este é invariante com a temperatura. Essa razão pode ser obtida derivando a equação (2-9) em função da temperatura [29], ficando a expressão na seguinte forma $\frac{dD}{dT} = \frac{dS_0}{dT}(\lambda - \lambda_0) - S_0 \frac{d\lambda_0}{dT}$. Fazendo $\lambda = \lambda_0$, obtém-se uma variação aproximada da dispersão na região da dispersão nula, dada por:

$$\left. \frac{dD}{dT} \right|_{\lambda=\lambda_0} = -S_0 \frac{d\lambda_0}{dT} = -0,039 \text{ fs/nm.km/}^\circ\text{C}, \text{ com } \frac{d\lambda_0}{dT} = 0,0054 \text{ nm/}^\circ\text{C}.$$

O valor obtido é indicador da relativa insensibilidade da dispersão às variações da temperatura no exterior, afectando contudo a eficiência FWM, dado o facto da dispersão na fibra variar na razão inversa, do parâmetro β_2 , o que, como referido anteriormente em 2.2.2.4, condiciona a coerência de fase $\Delta k \approx \beta_2(\omega_i - \omega_k)(\omega_j - \omega_k)$ (ver (2-21)). Uma variação positiva da dispersão fará decrescer a eficiência FWM e, a uma variação negativa terá o efeito inverso.

Para concluir o estudo do efeito FWM, realizado ao longo deste capítulo, de seguida avalia-se a eficiência FWM dos 13 produtos FWM mais significativos (Figuras 5-15 e 5-16). Essa eficiência FWM, como referido anteriormente, determina-se com recurso da equação (2-22).

Os passos para essa avaliação são, seguindo a metodologia usada anteriormente relativamente ao produto FWM 16; primeiro determinam-se os valores da dispersão para os comprimentos de onda médios de cada produto FWM (ver Figura 5-19), que nas fibras DSF podem ser obtidos com recurso da equação (2-9) [7,14,16]. De seguida, e sucessivamente determinam-se; o parâmetro β_2 , com recurso da equação (2-8), e a partir deste, o factor de discordância de fase (Δk), equação (2-21), condição para posterior avaliação da variação da eficiência FWM, tomando como referência os valores médios de λ_0 , e de S_0 , verificados para uma temperatura ambiente média de 15°C .

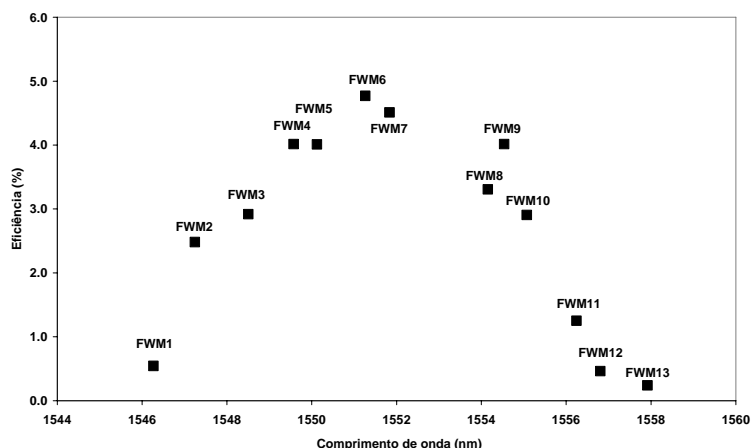


Figura 5-22: Valores (médios) de eficiência FWM observados nos produtos da Figura 5-15, para uma temperatura ambiente de 15 °C.

Os baixos valores de eficiência FWM, observáveis na Figura 5-22, devem-se essencialmente, a ter sido usado um espaçamento não uniforme entre canais. Essa situação, desfavorece a concordância de fase e faz com que maioria dos produtos FWM gerados caiam fora da janela óptica onde se inscrevem os canais originalmente injectados na fibra, ou entre canais, conduzindo a uma situação de diafonia incoerente fora de banda [4].

Por outro lado, as Figuras 5-15 e 5-22 tornam evidente, que a eficiência FWM é mais favorecida nos produtos FWM, mais próximos dos canais de bombagem, e particularmente naqueles cujos comprimentos de onda, se encontram mais próximos da região de dispersão nula [19], ou seja, os produtos FWM, 6 e 7, nos quais a degradação será mais acentuada, o que concorda com a caracterização do fenómeno efectuada anteriormente em 2.2.2.4.

Em conclusão, as medições realizadas na rede, mostram que a fibra de dispersão deslocada coloca restrições na implementação de sistemas multicanal densos, devido a diafonia que o efeito FWM provoca e, que neste tipo de fibra é maximizado, quando se transmite próximo do comprimento de onda de dispersão nula.

Os valores obtidos experimentalmente confirmam os dados da Tabela 5-4 relativamente ao desvio de D e de λ_0 nas fibras amostradas, e coloca o canal 3 (da Figura 5-16) muito próximo dessa região. Esta circunstância prova que o espaçamento desigual entre canais é uma boa estratégia na implementação de sistemas multicanal em fibras de dispersão deslocada.

5.5 Conclusões

O conjunto de medições e respectivos resultados apresentados ao longo deste capítulo, inserem-se numa estratégia que perspectiva a avaliação constante da qualidade de uma rede óptica. Com essa intenção a confrontação dos parâmetros medidos na rede óptica com os requisitos especificados nas recomendações da ITU-T podem dar indicadores seguros relativamente a optimização da mesma rede.

Uma conclusão a retirar da avaliação produzida neste capítulo, e da leitura das recomendações da ITU-T, é a de que a rede óptica em operação é mais rapidamente limitada pela atenuação, assumindo-se transmissão monocanal, que devido aos efeitos dispersivos nas fibras. Complementarmente, verificou-se ser a dispersão relativamente imune a variações exteriores da temperatura.

As perdas ópticas de retorno e as reflexões discretas, dentro dos parâmetros da rede, são os que com maior regularidade deverão ser avaliados, dado serem de fundamental importância no desempenho global dos sistemas. Com essa intenção compararam-se os desempenhos de duas conectorizações; FC/PC e FC/APC, podendo concluir-se que usando o último tipo de conectores se consegue um melhor desempenho relativamente as perdas de inserção e muito acentuadamente relativamente as perdas de retorno, como esperado.

Ainda relativamente a medição das reflexões discretas, e em linha com os considerandos realizados no capítulo anterior, relevou-se mais uma vez a utilização do OTDR, cuja capacidade de diagnostico, constitui uma forma pratica e célere, de avaliação dos diversos componentes passivos da rede.

Um dos parâmetros da rede avaliados foi a PMD. Muito embora, a avaliação aqui produzida diga apenas respeito a uma pequena secção da rede óptica, permite contudo concluir, que a rede óptica avaliada embora cumprindo globalmente com os requisitos especificados nas recomendações da ITU-T, poderá apresentar valores elevados, no caso dos sistemas cujos requisitos sejam mais apertados quanto a esse parâmetro.

Relativamente a transmissão multicanal, especial atenção foi dedicada ao fenómeno da FWM, tendo-se apresentado e discutido valores medidos na rede, que permitem avaliar o impacto deste efeito não linear, nas fibras ópticas de dispersão deslocada. Verificou-se que a utilização da técnica de espaçamento não uniforme entre canais, faz com que os produtos FWM gerados não se sobreponham no mesmo comprimento de onda dos canais injectados na fibra, diminuindo o efeito

da diafonia, permitindo dessa forma a implementação de tecnologias WDM, que era o que se queria provar.

5.6 Referências

- [1] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable”, Rec. G.653, 1997.
- [2] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 systems and other systems with optical amplifiers”, Rec. G.691, 2000.
- [3] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy”, Rec. G.957, 1995.
- [4] Gerd Keiser, “Optical Fiber Communications”, 3rd ed., McGraw-Hill Higher Education, 2000.
- [5] Govind P. Agrawal, “Fiber-Optic Communication Systems”, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [6] Dennis Derickson, “Fiber optic test and measurement”, Prentice-Hall, 1998.
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures - Chromatic dispersion”, IEC 793-1-C5A, 1992. Actualmente com a referência IEC 60793-1-42 - Ed. 1.0 , Método A, 2001.
- [8] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of synchronous digital hierarchy (SDH) equipment functional blocks”, Rec. G.783, 2000.
- [9] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures - Attenuation”, EN/IEC 60793-1-40 (Método B), 2001.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Transmitted or radiated light power, IEC 793-1-C4, 1992.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures - Attenuation”, EN/IEC 60793-1-40 (Método D), 2001.
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures - Attenuation”, EN/IEC 60793-1-40 (Método C), 2001.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC), Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-6: Examinations and measurements – “Return loss”, IEC 61300-3-6 (Procedimento 4.1), 2005.
- [14] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion”, EN/IEC 60793-1-42 (Método C), 2004.
- [15] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – “Polarization mode dispersion measurement techniques for single-mode optical fibres “, IEC/TS-61941 (Método C), 2000.
- [16] M. Matos, A. Teixeira e P. André, “Caracterização da dispersão numa rede óptica em operação”, em fase de publicação, na Revista do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

- [17] M. Matos, A. Teixeira e P. André, “PMD Characterization of installed fiber-optic cables”, apresentado ao III Symposium on Enabling Optical Networks – SEON 2005, Junho de 2005, Instituto de Telecomunicações (IT), Aveiro, Portugal.
- [18] M. Matos, A. Teixeira e P. André, “Long-term Four Wave Mixing evaluation in an installed dispersion fiber-optic cable network”, apresentado ao IV Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, Junho de 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto, Portugal.
- [19] M. Matos, A. Teixeira e P. André, “FWM efficiency correlation with temperature variation in a dispersion-shifted fiber”, submetido a publicação no Internacional Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2007, Salvador, BA, Brasil.
- [20] Rajappa Papannareddy, “Introduction to lightwave communication systems”, Artech House, Boston, 1997.
- [21] A. W. Snyder e D. L. Love, “Optical Wavelength Theory”, Chapman & Hall, Nova Iorque, 1983.
- [22] M. M. K. Liu, “Principles and Applications of Optical Communications”, Irving, Chicago, 1996.
- [23] R. Ramaswami e K.N. Sivaraja, “Optical Networks: A Practical Perspective”, 2ª edição, Morgan Kaufmann Publishers, São Francisco, 2002.
- [24] P. E. Green Jr., “Fiber-optical Networks”, Prentice Hall, Nova Jersey, 1993.
- [25] D. W. Smith, “Optical Network Technology”, Chapman & Hall, Nova Iorque, 1995.
- [26] Gerd Keiser, “A review of WDM technology and applications”, Optical Fiber Technology, vol. 5, pp. 3-9, 1999.
- [27] Sang Hyuck Kim, Dong Hwan Kim, Jae Cheol e Kyu Man Cho, “Temperature dependence of the zero-dispersion wavelength of dispersion-shifted fiber”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37, pp. L1043-L1045, 1998.
- [28] P. S. André e J. L. Pinto, “Simultaneous measurement of the nonlinear refractive index and chromatic dispersion of optical fibers by four-wave mixing”, Microwave and Optical Technology Letters, vol. 34, nº4, pp. 305-307, 2002.
- [29] Paulo S. André e Armando N. Pinto, “Chromatic dispersion fluctuations in optical fibers due to temperature and its effects in high-speed optical communication systems”, Optics Communications, vol. 246, Issues 4-6, pp. 303-311, 2005.

Capítulo 6

Optimização de uma rede óptica em operação

Este capítulo trata a optimização da rede óptica em operação tendo por base os parâmetros avaliados no capítulo anterior e o estudo realizado nos capítulos 2 e 3. Toda a rede óptica foi avaliada inicialmente em termos das especificações da recomendação G.653 [1] da ITU-T através de ensaios de certificação, que incidiram essencialmente na avaliação dos parâmetros da dispersão cromática, das perdas totais de inserção e da reflectometria óptica, conforme os procedimentos descrito no capítulo 4.

Mais recentemente, foram avaliados em determinados pontos da rede óptica os parâmetros; dispersão cromática, PMD e eficiência FWM. Paralelamente foram ainda verificados os valores das refletâncias discretas e das perdas de inserção. Os resultados das medições revelam que a rede óptica está conforme as especificações da recomendação G.653 [1] da ITU-T e não existirem indícios de envelhecimento das fibras ou de contaminação por infiltração de água.

Os dados das medições realizados na altura da instalação, em 1996, complementados por medições mais recentes, servirão de base ao estudo de cenários de optimização da rede óptica em operação com recurso a uma ferramenta de simulação, o programa VPI TransmissionMaker.

A avaliação consiste no estabelecimento de cenários de implementação de hierarquias STM-N, inicialmente numa perspectiva monocanal e depois com a introdução de elementos das redes WDM, numa perspectiva multicanal. Os critérios a adoptar são os especificados nas recomendações da ITU-T (G.957 [4], G. 691 [2] e G.692 [3]) na implementação dos sistemas hierárquicos STM-N e das redes WDM.

Com essa intenção e, nas duas primeiras secções, avaliam-se separadamente cenários de optimização da rede óptica, inicialmente para sistemas monocanal e num segundo passo para redes multicanal.

Na terceira secção aborda-se de uma forma sucinta a optimização da rede, usando uma diferente aproximação, pela compensação dos efeitos da dispersão e dos efeitos não lineares da fibra, concatenando a fibra DSF com outros tipos de fibras monomodo.

Por último, nas quarta e quinta secções, relevam-se os aspectos mais importantes do estudo realizado e, retiram-se as conclusões do estudo realizado.

6.1 Optimização da rede óptica: Perspectiva monocalnal

Uma forma de modelar uma rede óptica na perspectiva da implementação de sistemas de comunicação ópticos monocalnal é a que a Figura 6-1 mostra (conforme a Tabela 5-1). A rede óptica é avaliada para os ritmos de transmissão de 2,5; 10 e 40 Gb/s. Os objectivos a alcançar em cada passo da avaliação é por um lado, garantir uma taxa de erros $\leq 10^{-12}$ no receptor e paralelamente uma margem de implementação do sistema não inferior a 6 dB.

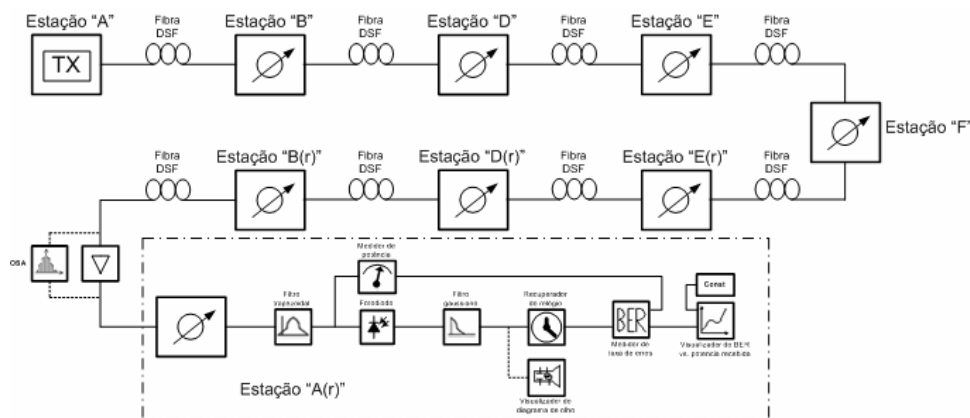


Figura 6-1: Modelo usado no simulador para avaliação da rede óptica da Tabela 5-1. O índice (r) aposto à identificação das estações significa o retorno pela fibra 2.

Os atenuadores variáveis (no simulador) são programados para um 1 dB na situação das estações intermédias, o que corresponde às perdas de inserção devidas às conectorizações nos repartidores ópticos (ODFs) das estações. Relativamente ao último atenuador da cadeia o valor a programar é função da sensibilidade do receptor (para uma taxa de erros de $\leq 10^{-12}$). A margem de implementação do sistema obtém-se deduzindo 1 dB (valor das perdas de inserção) ao valor programado nesse atenuador.

A margem de implementação dos sistemas é devida a um conjunto de perdas relativas a elementos ou eventos discretos na fibra óptica (por exemplo, os derivados da dependência da polarização e/ou do comprimento de onda), acomodando dum modo dinâmico o crescimento da rede, ou a implementação de sistemas cujas especificações sejam mais restritivas, caso das redes WDM. Na Tabela 6-1 sumarizam-se esses valores [10].

Parâmetro	Margem (dB)
Dispersão	1,0
SPM	0,5
XPM	0,5
FWM	0,5
SRS/SBS	0,5
PDL	0,5
PMD	0,5
Sensibilidade do receptor	0,5
<i>Chirp</i>	0,5
Conectores ópticos	1,0
TOTAL	6,0

Tabela 6-1: Factores que contribuem para a margem de implementação dos sistemas de comunicação ópticos.

Como já referido anteriormente, por motivo da omissão da estação C no modelo de simulação (Figura 6-1) por terem sido colocadas a direito as fibras nessa estação, devido a distância muito curta entre esta e a estação D (~200 metros), os atenuadores variáveis na estação D são programados para perdas de 2 dB. Na configuração de teste da Figura 6-1 usaram-se as fibras 1 e 2, de ida e de retorno, respectivamente.

Os valores de sensibilidade dos receptores, das características espectrais e de potência da fonte óptica, bem como das especificações dos amplificadores são retirados das recomendações da ITU-T (nomeadamente as G.957 [4], G.691 [2] e G.692 [3]) e seguem as características técnicas de equipamentos comerciais de uso corrente em sistemas de comunicação ópticos, sem referência a nenhum fornecedor específico. Na Tabela 6-2 mostram-se algumas das especificações mais importantes dos amplificadores usados nas simulações.

Parâmetro	Valor		Un.
	Máx.	Min.	
Intervalo de comprimentos de onda ($\Delta\lambda$) ⁽¹⁾	1530	1560	nm
Intervalo de potência do sinal de entrada	-15	-4	dBm
Intervalo de potência de saída ⁽²⁾	+9,5 +14,5	+11 +16	dBm
Uniformidade do ganho espectral (ΔG)	3		dB
Figura de ruído (N_f)	8		dBm
⁽¹⁾ Neste intervalo de comprimentos de onda podem ser inscritos até 16 canais (WDM).			
⁽²⁾ Neste intervalo de potências de saída enquadram-se os amplificadores de potência mais elevada (+10 a +16 dBm) e do tipo standard (+10 a +13 dBm).			

Tabela 6-2: Características mais importantes dos amplificadores usados nas simulações.

O sistema de transmissão (Tx) da Figura 6-1 é constituído por um laser DBF de modulação externa, um gerador de bits de sequências pseudo-aleatórias (PRBS), um codificador NRZ, um ajustador do tempo de subida do bit e finalmente um modulador Mach-Zehnder.

Na simulação existem um conjunto de dispositivos de visualização que auxiliam a avaliação. Assim e começando pelo analisador de espectros a sua colocação permite analisar o espectro do sinal no domínio da frequência em pontos estratégicos da rede, nomeadamente antes e após a amplificação. Com o auxílio do osciloscópio pode ser observado o diagrama de olho do sinal após detecção. Por último, o visualizador do tipo XY permite traçar curvas que caracterizam a propagação do sinal ao longo do comprimento da fibra em função da atenuação e da dispersão.

Uma vez que o comprimento (L) da rede óptica se situa entre Long-Haul e Very-Long-Haul, $80 \text{ km} \leq L \leq 120 \text{ km}$, a primeira questão a ser resolvida era a de adequar as condições de transmissão às limitações impostas pela própria rede, em termos de perdas e da dispersão por forma a atingir-se os objectivos anteriormente definidos, relativamente à taxa de erros no receptor e a margem de implementação.

Assim, a metodologia usada na avaliação da rede óptica passou por testar a secção completa num comprimento total de $\sim 107 \text{ km}$, tendo por base os parâmetros das aplicações L-x.3 e V-y.3 (onde os índices x e y representam o nível hierárquico SDH).

Um outro critério usado na avaliação foi testar a rede óptica em função de vários comprimentos de onda discretos, para cada taxa de transmissão. Esta metodologia permite por um lado aferir para um espectro alargado onde é mais prático a implementação de sistemas multicanal e por outro lado, caracterizar a resposta dos amplificadores usados nas simulações.

Na Tabela 6-3 caracteriza-se a dispersão acumulada no percurso completo da Tabela 5-1, em função de cada comprimento de onda discreto, a avaliar. O coeficiente de dispersão cromática (D), são determinados a partir da equação (2-9) para cada comprimento de onda discreto, assumindo os valores médios de λ_0 e S_0 , respectivamente, 1552.858 nm e $0,0725 \text{ ps/nm}^2.\text{km}$, encontrados anteriormente no capítulo 5, ver secção 5.4.

Dispersão acumulada no percurso óptico com $\sim 107 \text{ km}$					
$\lambda \text{ (nm)}$	1530,334	1540,557	1550,116	1552,524	1560,810
Dispersão acumulada (ps/nm)	-175,6	-95,9	-21,4	-2,6	62,0
Largura de banda	3,79 THz				

Tabela 6-3: Dispersão acumulada no percurso óptico da Tabela 5-1, com comprimento $\sim 107 \text{ km}$.

A selecção dos comprimentos de onda teve por base o intervalo ($\Delta\lambda$) do amplificador óptico (escolheram-se as correspondentes frequências ópticas extremas, duas centrais e a mais próxima

dos 1550 nm), e as especificações da recomendação G.692 [3] da ITU-T, para um espaçamento de 100 GHz por canal (com centro na frequência óptica 193,1 THz).

Após as considerações preliminares o processo das simulações inicia-se para a taxa de transmissão de 2,5 Gb/s. Na Tabela 6-4 resumem-se os parâmetros principais a usar na simulação para a frequência óptica de 193,1 THz. No valor das perdas de inserção incluem-se as perdas de 26,75 dB na fibra e de 9 dB nos atenuadores variáveis.

Parâmetro	Valor	Un.
Potência do emissor (P_{tx})	+2	dBm
Sensibilidade do receptor ($BER \leq 10^{-12}$)	-27	dBm
Dispersão (D)	-0,024	ps/nm.km
Coefficiente de atenuação (α)	0,25	dB/km
Perdas de inserção	35,75	dB

Tabela 6-4: Parâmetros mais importantes usados na simulação de um ritmo de transmissão a 2,5 Gb/s, para a aplicação L-16.3 em 1552,524 nm.

Após correr a simulação os valores obtidos foram:

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	1,58	+2,0	-25,97	8,01E-12	6,4	68,07

Tabela 6-5: Valores obtidos na simulação usando os parâmetros da Tabela 6-4.

onde, P_{tx} e P_{rx} , representam a potência emitida e recebida, respectivamente e L a distância percorrida pelo sinal na fibra.

Os valores encontrados na simulação eram esperados dado o intervalo das perdas toleráveis se situarem no intervalo 10-24 dB (da Tabela 3-4) e as perdas de inserção serem da ordem dos ~36 dB (valor derivado da Tabela 5-1). Dada essa situação, a rede óptica em avaliação não pode ser classificada como Long-Haul na sua extensão completa de ~107 km, cumprindo contudo os requisitos especificados para a aplicação L-16.3 numa ligação (hipotética) entre as estações A e E(r) com um comprimento um pouco acima de 68 km.

O próximo passo na simulação é avaliar a rede óptica para a classificação Very-Long-Haul (aplicação V-16.3). Para essa aplicação os parâmetros a usar na simulação são semelhantes aos anteriores com a diferença da potência da fonte óptica poder ir até +13 dBm, com a utilização de um amplificador de potência, imediatamente a seguir ao módulo Tx. Significa isto que de uma aplicação para a outra (de Long-Haul para Very-Long-Haul) o parâmetro mais significativo que varia é o da potência do emissor, o que faz sentido, uma vez que os outros parâmetros não são mutáveis por princípio, ou seja, os parâmetros da rede e do receptor.

Em consequência da potência óptica do emissor ser mais elevada o intervalo das perdas toleráveis é também ele superior passando para 22-33 dB (da Tabela 3-5). A Tabela 6-6 mostra os novos valores obtidos na simulação.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	+13,0	-28,01	2,69E-12	6,8	107,14

Tabela 6-6: Valores obtidos na simulação usando os parâmetros da Tabela 6-4 para uma potência óptica transmitida de +13 dBm.

Pela observação dos dados da Tabela 6-6 verifica-se que a rede óptica cumpre com os dois objectivos principais da simulação, relativamente a taxa de erros no receptor e à margem de implementação, em 1552,52 nm.

Para concluir as simulações para a taxa de transmissão 2,5 Gb/s falta apresentar os valores obtidos com as frequências ópticas: 195,9; 194,6; 193,4 e 192,1 THz, valores esses condensados na Tabela 6-7.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1530,30	195,9	19,95	+13,0	-25,81	1,61E-12	6,6	107,14
1540,56	194,6	19,95	+13,0	-27,41	4,46E-12	6,2	107,14
1550,12	193,4	19,95	+13,0	-28,01	2,71E-12	6,8	107,14
1560,81	192,1	19,95	+13,0	-25,91	4,11E-12	6,7	107,14

Tabela 6-7: Valores obtidos na simulação usando os parâmetros da Tabela 6-4.

Pela observação dos dados da Tabela 6-7 conclui-se que a rede óptica no espectro óptico analisado cumpre com os requisitos especificados, quer relativamente à taxa de erros no receptor, quer quanto a margem de implementação.

Dado já anteriormente ter-se concluído que a secção da rede óptica com ~107 km não cumpre com os parâmetros da configuração Long-Haul (aplicação L-16.3), inicia-se a avaliação a um ritmo de transmissão de 10 Gb/s por se verificar se pode cumprir os parâmetros da aplicação L-64.3.

Uma forma pratica de fazer essa avaliação é através das perdas de inserção. Assim, fazendo $A_{tol} = P_{tx} - P_{rx} = +13 - (-13) = 26$ dB, onde A_{tol} , representa a diferença entre a potência do emissor (P_{tx}) e a sensibilidade do receptor (P_{rx}) para uma dada taxa de erros, se a este valor for retirada a margem de implementação, significa que as perdas de inserção deverão situar-se em cerca de 20 dB.

Contudo, sendo o valor real destas perdas superior em cerca de 16 dB, significa que a secção da rede óptica em avaliação não poderá cumprir com os parâmetros da aplicação L-64.3 na sua

extensão completa de ~107 km. Na Tabela 6-8 comparam-se os principais parâmetros das aplicações L-64.3 e V-64.3.

Parâmetro	L-64.3		V-64.3	
	Valor	Un.	Valor	Un.
Potência do emissor (P _{tx})	+13	dBm	+13	dBm
Largura espectral	10	MHz	10	MHz
Sensibilidade do receptor (BER ≤ 10 ⁻¹²)	-13	dBm	-24	dBm
Dispersão máxima	260	ps/nm	400	ps/nm
Coefficiente de atenuação (α)	0,25	dB/km	0,25	dB/km
Perdas toleráveis	16-22	dB	22-33	dB
Perdas de inserção	35,75	dB	35,75	dB

Tabela 6-8: Parâmetros mais significativos das aplicações L-64.3 e V-64.3.

Comparando as aplicações L-64.3 e V-64.3, pela leitura dos dados condensados na Tabela 6-8, verifica-se que o parâmetro mais significativo que varia, é o da sensibilidade do receptor, -24 dBm, em V-64.3, sendo as perdas toleráveis, consequentemente, de valor superior, que na aplicação L-64.3.

As simulações a um ritmo de 10 Gb/s, iniciam-se usando os parâmetros da aplicação V-64.3 (Tabela 6-8), num sistema sem amplificação, sendo contudo, as perdas na fibra, superiores em ~3 dB, que o valor máximo das perdas toleradas (33 dB). Os valores obtidos apresentam-se na Tabela 6-9.

λ (nm)	ν (THz)	P _{tx}		P _{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	+13,0	-22,10	3,70E-12	1,5	107,14
1530,30	195,9	19,95	+13,0	-22,86	1,01E-12	1,6	107,14
1540,56	194,6	19,95	+13,0	-23,06	9,12E-12	1,7	107,14
1550,12	193,4	19,95	+13,0	-23,06	9,16E-12	1,7	107,14
1560,81	192,1	19,95	+13,0	-22,96	3,02E-12	1,6	107,14

Tabela 6-9: Valores obtidos na simulação a um ritmo de transmissão de 10 Gb/s.

Analisando os dados da Tabela 6-9 verifica-se que a secção da rede óptica em avaliação, com ~107 km, cumpre parcialmente com os critérios definidos, ou seja, cumpre relativamente a taxa de erros no receptor, sendo contudo insuficiente a margem de implementação.

Para resolver esta situação é possível equacionar três cenários: o primeiro, passa por usar um emissor de maior potência regulado para +16 dBm, por exemplo, o segundo e o terceiro cenários passam por instalar amplificação; em linha ou pré-amplificação, respectivamente. Estes últimos amplificadores são bloqueados para emitirem uma potência à saída de +10 dBm, menor potência do emissor (da Tabela 3-3), para a aplicação V-64.3.

A avaliação seguinte irá centrar-se na frequência óptica 193,1 THz dado que para as outras frequências ópticas consideradas anteriormente existir uma grande similitude de resultados. Na simulação usou-se um amplificador de potência mais elevado (+16 dBm), que cumpre com os requisitos da protecção da vista (critério $P_{tx} \leq +17$ dBm) e, obtiveram-se os resultados que a Tabela 6-10 mostra.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	39,81	16,0	-22,98	2,79E-12	4,6	107,14

Tabela 6-10: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-64.3, usando uma potência de emissão de +16 dBm.

O passo seguinte é simular amplificação em linha, colocando um amplificador a meio da cadeia, ou seja, na estação F. Os valores obtidos na simulação são os que a Tabela 6-11 mostra.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	13,0	-22,97	2,81E-12	17,6	107,14

Tabela 6-11: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-64.3 usando amplificação em linha.

O último passo das simulações na rede óptica consiste na utilização de pré-amplificação, colocando um amplificador no fim da cadeia, ou seja, na estação A(r). Os valores obtidos na simulação são os que se mostram na Tabela 6-12.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	13,0	-22,9	2,65E-12	31,9	107,14

Tabela 6-12: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-64.3 usando pré-amplificação.

Na Figura 6-2, compara-se o efeito da utilização de amplificação em linha e da pré-amplificação. Em ambas as situações mostra-se o espectro do sinal antes e após amplificação. Os gráficos da figura foram obtidos usando uma resolução no OSA = 12,5 GHz, de forma a suprimir o ruído nas formas de onda. O OSA realiza esta operação através da convolução do sinal amostrado com uma função Gaussiana, com a largura espectral atrás referida.

O gráfico da Figura 6-2 (a) mostra o espectro do sinal a meio percurso (medido na estação F antes do amplificador) e no fim da cadeia (medido após o último atenuador variável), usando amplificação em linha. Por sua vez, no gráfico da Figura 6-2 (b), mostra-se o espectro do sinal medido antes da amplificação e no fim da cadeia (depois do último atenuador variável), usando pré-amplificação óptica.

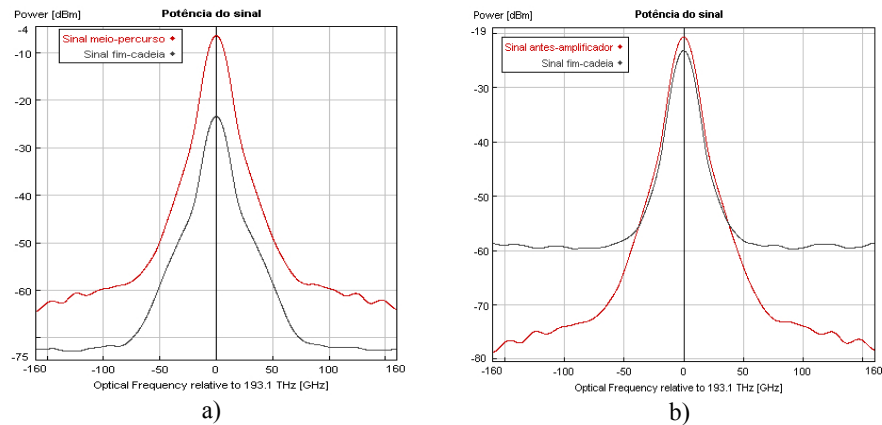


Figura 6-2: Espectro do sinal antes e após amplificação, num sistema monocanal a 10 Gb/s: a) usando amplificação em linha, b) usando pré-amplificação.

Relativamente aos valores obtidos nas últimas simulações podem ser retiradas conclusões de implementação. Assim, começando pelo primeiro cenário, utilizando um amplificador de maior potência (+16 dBm) pode ser referido que muito embora não se tenha cumprido cabalmente os critérios propostos, a margem de implementação obtida de 1,6 dB é inferior ao critério, esta situação é de resolução relativamente fácil, mudando o tipo de conectorização (de FC/PC para FC/APC, ou alternativamente, para E2000/APC, por exemplo). Contudo, tem como desvantagem a injeção de níveis de potência óptica elevados na rede.

Relativamente aos dois outros cenários, utilização de amplificação em linha ou pré-amplificação, na linha de análise terão de ser considerados e pesados factores de outro tipo, como os económicos, por exemplo.

Usando amplificação em linha tem como vantagem principal permitir um melhor equilíbrio e distribuição da potência óptica em toda a rede, observável na Figura 6-2, as perdas na primeira secção da rede (da estação A à F) são ~15,3 dB e na segunda parte são ~14,3 dB. A maior desvantagem deste procedimento, prende-se com o facto de obrigar a instalar um novo armário na estação F, e um correspondente sistema de alimentação socorrida dedicado (UPS).

Usando pré-amplificação a principal desvantagem é do desequilíbrio da potência do sinal na rede. Como se pode verificar na Figura 6-2, as perdas são ~29,6 dB desde a estação A até ao amplificador, o que faz com que grande parte do ganho de amplificação se perca no atenuador variável na estação A(r), de forma a que potência óptica a entregar ao receptor não exceda o valor da potência máxima (*overload*) no receptor (-8 dBm, especificado na recomendação G.691 [2] da ITU-T).

Por outro lado e, em razão das perdas, o nível de potência depois do último atenuador (fim da cadeia), é da ordem dos -22 dBm (Tabela 6-9, em 1552,52 nm). Uma degradação num cordão ou conector ópticos, em qualquer das estações intermédias, fará com que o sistema fique instável ou, fora dos limites de funcionamento.

Uma vantagem da utilização deste tipo de amplificação, no caso da utilização de um SOA, é a sua capacidade de integração com outros dispositivos ópticos, como referido anteriormente na secção 3.2, o que poderá ser atractivo do ponto de vista económico.

Na avaliação da transmissão a 40 Gb/s socorremo-nos dos parâmetros usados em equipamentos comerciais, dado não existirem nas recomendações da ITU-T especificações definitivas para esse ritmo de transmissão, por se encontrarem ainda na fase de elaboração e/ou conclusão. Contudo, para ritmos de transmissão acima de 10 Gb/s, os critérios anteriormente definidos não são suficientes, uma vez que há a considerar a combinação dos efeitos lineares e não lineares na fibra, particularmente o efeito SPM. Em face disso, a avaliação inicia-se com a ponderação dos factores de penalidades e limitações impostos pelo efeito SPM.

Tal como referido em 2.2.2.2, o *chirp* induzido pela SPM afecta o formato dos impulsos sob o efeito da dispersão da velocidade de grupo. Em geral, o espectro do sinal devido a SPM é alargado consideravelmente o que limita o desempenho dos sistemas. Usando a aproximação dada pela equação (2-15) e usando o critério $\phi_{NL} = 0,1$ como valor máximo admissível do desvio de fase não linear, o valor da potência máxima (nominal) a injectar na fibra deverá ser inferior a 25 mW (ou, +14 dBm). Na simulação usamos uma potência de +13 dBm.

Por motivo de simplificação de análise as simulações restringem-se a apenas algumas frequências ópticas, cobrindo um conjunto de situações suficientes a retirarem-se conclusões de implementação. Na Tabela 6-13 resumem-se os parâmetros principais da aplicação V-256.3 a usar no simulador.

Parâmetro	V-265.3	
	Valor	Un.
Potência do emissor (Ptx)	+13	dBm
Largura espectral	10	MHz
Sensibilidade do receptor (BER $\leq 10^{-12}$)	-18	dBm
Coefficiente de atenuação (α)	0,25	dB/km
Perdas de inserção	35,75	dB

Tabela 6-13: Parâmetros mais importantes a serem usados nas simulações de um sistema a 40 Gb/s (aplicação V-256.3).

Após correr a simulação obtiveram-se os valores inscritos na Tabela 6-14, usando-se os parâmetros anteriormente apresentados na Tabela 6-13 e o critério $\phi_{NL} = 0,1$.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1560,81	192,1	19,95	13,0	-20,88	1,70E-06	0,0	107,14
1552,52	193,1	19,95	13,0	-20,94	5,41E-07	0,0	107,14
1550,12	193,4	19,95	13,0	-20,49	1,35E-06	0,0	107,14

Tabela 6-14: Valores obtidos na simulação a um ritmo de transmissão de 40 Gb/s, usando os parâmetros da Tabela 6-13.

Pela observação dos dados da Tabela 6-14, verifica-se ser o nível de potência do sinal (+13 dBm) insuficiente, para cumprir com os critérios anteriormente definidos, quer quanto à taxa de erros no receptor, quer quanto à margem de implementação.

Com um novo teste à rede, agora apenas para a frequência óptica de 193,1 THz poderá verificar-se qual a distância possível de ser percorrida pelo sinal, mantendo a potência do emissor e por outro lado, quanto teria de ser a potência do emissor para cumprir com os requisitos anteriormente enunciados, mantendo agora a distância a percorrer.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	13,0	-19,37	2,46E-12	6,7	53,57
1552,52	193,1	112,00	20,5	-19,67	2,26E-12	6,0	107,14

Tabela 6-15: Valores obtidos nas simulações para a aplicação V-256.3 na avaliação da maior distância possível de ser percorrida mantendo a potência do emissor e complementarmente para verificação da potência óptica necessária para percorrer ~107 km.

A Tabela 6-15 apresenta os novos valores obtidos nas simulações relativamente às duas soluções que se queriam testar.

Uma outra aproximação possível é utilização de amplificação óptica, instalando amplificadores em linha e pré-amplificadores, e testar essas soluções. Os amplificadores são bloqueados, para emitirem uma potência óptica de saída, de +10 dBm.

Começando por testar a solução da amplificação em linha, esta solução passa por colocar um amplificador a meio da cadeia, portanto, na estação F. Os valores obtidos na simulação mostram-se na Tabela 6-16 apenas para a frequência óptica de 193,1 THz, para não tornar fastidiosa a avaliação.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	+13,0	-19,39	1,67E-12	14,0	107,14

Tabela 6-16: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-256.3 usando amplificação em linha.

Em linha com a avaliação anterior, na simulação seguinte, testa-se a pré-amplificação, colocando um amplificador no fim da cadeia, estação A(r). Os valores obtidos na simulação são os inscritos na Tabela 6-17, apenas para a frequência óptica de 193,1 THz.

λ (nm)	ν (THz)	P_{tx}		P_{rx} (dBm)	BER	Margem (dB)	L (km)
		(mW)	(dBm)				
1552,52	193,1	19,95	+13,0	-18,42	2,43E-12	27,0	107,14

Tabela 6-17: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-256.3 usando pré-amplificação.

Comparando o efeito da amplificação em linha e da pré-amplificação, verifica-se que o sinal injectado na fibra tem essencialmente o mesmo comportamento, quer se trate de um sistema com um ritmo de transmissão a 10 ou 40 Gb/s. A diferença reside ao nível do ruído acumulado. Ou seja, num sistema a 40 Gb/s esse efeito com a distância, é cerca de 7 dB superior, que num sistema a 10 Gb/s, comparando a Figura 6-3(b), com a homóloga (Figura 6-2(b)). Também nesta situação, o facto do nível do sinal chegar muito atenuado ao amplificador, faz com que o sistema tenda a ficar instável, em virtude das naturais flutuações da rede.

Por outro lado, num sistema a 40 Gb/s o efeito da dispersão, torna-se igualmente notório, situação verificável quando se compara a largura dos impulsos nas Figuras 6-2 e 6-3, pelo que o efeito conjunto da dispersão e do ruído, coloca restrições importantes no dimensionamento de um percurso óptico, particularmente nas situações em que se pretenda o *upgrade* do ritmo de transmissão. Nas simulações usou-se uma largura de banda (no OSA) de 25 GHz.

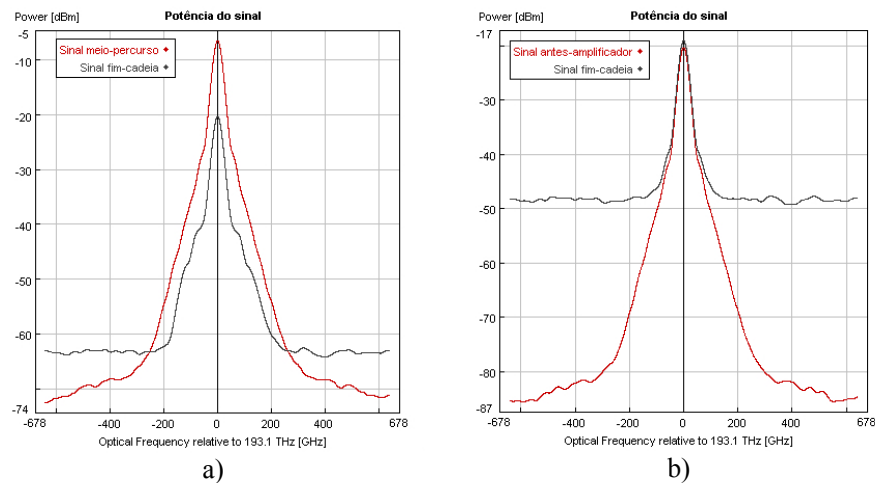


Figura 6-3: Espectro do sinal antes e após amplificação, num sistema monocanal a 40 Gb/s: a) usando amplificação em linha, b) usando pré-amplificação.

Fazendo agora uma discussão breve relativamente aos valores obtidos nas últimas simulações, deve começar por ser referido que dada a pouca experiência de funcionamento com sistemas de comunicação ópticos a operar a essa taxa de transmissão (40 Gb/s) e não estando

finalizadas especificações da ITU-T não é seguro apontarem-se conclusões definitivas de implementação. Contudo, e em face do estudo realizado anteriormente no capítulo 2, quanto aos factores que limitam a transmissão, podem perscrutar-se caminhos mais viáveis para a realizar.

Assim, começando pelo primeiro cenário, verifica-se que com uma potência emitida de +13 dBm se consegue alcançar um comprimento de fibra com cerca de 54 km. Provavelmente este cenário deverá ser o que melhor se adequa às condições da rede, e por outro lado, mantendo-se o nível da potência emitida relativamente baixo, as não linearidades devidas ao efeito de Kerr não deverão ser significativas atendendo ao valor igualmente baixo da dispersão acumulada para essa distância (cerca de -21 ps/km em 1550 nm, da Tabela 6-3). Contudo este tema deverá ser melhor desenvolvido, constituindo-se como uma continuação possível do presente trabalho.

Reportando-nos agora ao segundo cenário, usando um amplificador óptico de +20,5 dBm, muito embora permita cumprir com alguns dos critérios definidos inicialmente, relativamente a taxa de erros no receptor e à margem de implementação, não cumpre com os outros dois critérios; quanto à protecção da vista e quanto à potência máxima a injectar na fibra para obviar a SPM não sendo por essa razão viável a sua utilização.

Relativamente aos dois outros cenários, utilização de amplificação em linha ou pré-amplificação, a linha de análise é em tudo semelhante à produzida anteriormente relativamente à transmissão de sinais a 10 Gb/s. Usando amplificação em linha tem a vantagem principal de permitir um melhor equilíbrio e distribuição da potência óptica em toda a rede.

Usando pré-amplificação, a principal desvantagem é o desequilíbrio da potência do sinal na rede, resultando daí uma dificuldade suplementar quanto a forma de compensar o ruído, dado que o sinal chega muito atenuado ao amplificador, em razão das perdas. Esta configuração tem ainda a desvantagem de grande parte da potência de pré-amplificação se perder no atenuador variável da última estação A(r), de forma a que potência óptica a entregar ao receptor não exceda o valor do nível de *overload* no receptor.

A grande vantagem desta metodologia, no caso de ser usado um SOA, é a capacidade deste dispositivo em ser integrado com outros dispositivos ópticos, como referido anteriormente.

6.2 Optimização da rede óptica: Perspectiva multicanal

O estabelecimento de cenários de implementação de sistemas de comunicação ópticos multicanal tem por base a avaliação realizada na secção anterior (relativa a sistemas monocanal), os factores que limitam a propagação de sinais nas fibras ópticas e os elementos passivos da rede

WDM (estudados anteriormente nos capítulos 2 e 3, respectivamente), nomeadamente os dispositivos WDM de (des)multiplexagem e na filtragem óptica.

A avaliação consiste na verificação da máxima distância (teórica) alcançável, para uma dada taxa de erros ($\leq 10^{-12}$), em sistemas sem amplificação, e inicia-se com a transmissão de 4 canais usando os parâmetros dos lasers CW apresentados na Figura 5-12 (relativa a avaliação realizada em Junho de 2006). Essa situação é depois reavaliada usando-se lasers com a mesma potência (usando-se um valor máximo abaixo do patamar dos efeitos não lineares).

Numa segunda fase avalia-se a transmissão de sistemas WDM constituídos por múltiplos de 8 canais (até um máximo de 80 canais), usando potências ópticas e espaçamento iguais, por comodidade na implementação das simulações e subsequente avaliação. O agrupamento dos canais baseia-se nas especificações da recomendação G.692 [3] da ITU-T (separações de canal, $\Delta_s = 100$ GHz), a que corresponde um intervalo espectral de 60,6 nm ($\sim 7,5$ THz), com centro na frequência óptica 193,1 THz (1552,524 nm).

Na implementação das simulações consideraram-se perdas de inserção relativas aos dispositivos WDM (MUX + DEMUX) + IMZ (Tx package) = 15 dB. Para minimizar os efeitos originados nas não linearidades na fibra, no simulador usaram-se lasers de modulação externa, com largura espectral de 120 MHz.

Na avaliação da transmissão WDM de 4 canais, usou-se um modelo de simulação em tudo semelhante ao apresentado anteriormente no capítulo 2 (ver Figura 2-17), com a inclusão de um atenuador de 6 dB antes do dispositivo WDM-DEMUX, que corresponde a margem de implementação do sistema. Comparam-se os ritmos de transmissão de 10 e 2,5 Gb/s, usando-se as frequências e potências ópticas da Figura 5-12.

λ		D (ps/nm-km)
notação	(nm)	
$\lambda_{c,1}$	1549,875	-0,22
$\lambda_{c,2}$	1551,605	0,09
$\lambda_{c,3}$	1553,010	0,01
λ_c	1551,443	0,10

Tabela 6-18: Valores da dispersão usados na simulação da transmissão de 4 canais com os parâmetros dos lasers da Tabela 5-7.

Os valores de dispersão da Tabela 6-18 foram obtidos, da forma referida em 6.1, a partir da equação (2-9), usando $\lambda_{0,\text{médio}} = 1552,858$ e $S_{0,\text{médio}} = 0,0725$ ps/nm²/km).

Optou-se por simular o sistema usando valores de dispersão, relativos a λ_c e, os correspondentes aos comprimentos de onda centrais entre portadoras ópticas adjacentes ($\lambda_{c,x}$), com

o intuito de minimizar a distorção dos resultados da avaliação, resultante da dependência da dispersão com o comprimento de onda.

Assumindo que $\alpha = 0,25$ dB/km é o mesmo para todos os canais e com $\gamma \approx 1,9$ (W.km)⁻¹ usando a equação 2-16, obtém-se um valor do desvio de fase não linear (ϕ_{\max}) entre 0,5 a 2, o que cumpre com requisito para implementação de sistemas WDM ($\phi_{\max} \approx 3$) [10,14].

Relativamente a penalidade de potência devida ao efeito de Raman (δ_R), e como referido na literatura [10,14], verifica-se que a média da potência óptica (por canal), coloca o sistema abaixo desse patamar, cumprindo-se com a margem de 0,5 dB (da Tabela 6-1), que constitui um dos quesitos da margem para implementação de sistemas de comunicação ópticos.

A potência total transmitida é de 29,9 mW (+15 dBm) que cumpre com o requisito da recomendação G.692 [3] da ITU-T relativamente a protecção da vista com $P_{\max} \leq +17$ dBm. As perdas totais de inserção são de 21 dB (15 dB relativos aos dispositivos WDM + 6 dB da margem de implementação).

Para não tornar demasiado entediante a explicação da avaliação, até porque já foi feita em linhas gerais na secção 5-4 (avaliação do efeito FWM), na Tabela 6-19 sumarizam-se os resultados obtidos na avaliação da máxima distância alcançada pelo canal de menor potência (1,99 mW, da Figura 5-12), usando os parâmetros atrás enunciados ($\text{BER} \leq 10^{-12}$), para os ritmos de transmissão; 2,5 e 10 Gb/s.

λ (nm)	D (ps/nm-km)	<i>Bit rate</i> (Gb/s)	L (km)	<i>Bit rate</i> (Gb/s)	L (km)
$\lambda_{c,1}$	-0,0808	2,5	29	10	17
$\lambda_{c,2}$	0,0457	2,5	26	10	16
$\lambda_{c,3}$	0,1484	2,5	27	10	15
λ_c	0,0338	2,5	28	10	16

Tabela 6-19: Distâncias alcançadas nas simulações em função da dispersão na fibra e do ritmo de transmissão, relativamente ao canal 3 da Figura 5-12.

Da análise dos dados da Tabela 6-19 verifica-se um comportamento muito semelhante do sinal em função da dispersão, alcançando-se distâncias muito baixas (a 10 Gb/s) e baixas (a 2,5 Gb/s) dado o valor elevado das perdas de inserção e a potência relativamente baixa transmitida no canal avaliado, ficando desta forma o sistema implementado limitado pela atenuação.

Reavaliando a situação anterior tendo em consideração os critérios anteriormente definidos, nomeadamente o da protecção da vista, usou-se agora a mesma potência óptica por canal ($P_{\text{ch}} = +10,98$ dBm e, obtiveram-se os valores que a Tabela 6-20 mostra (relativos unicamente a λ_c).

λ (nm)	D (ps/nm-km)	Bit rate (Gb/s)	L (km)	Bit rate (Gb/s)	L (km)
λ_c	0,0338	2,5	56	10	36

Tabela 6-20: Distância alcançada na transmissão WDM de 4 canais (relativamente ao canal 3 da Tabela 5-79), usando a mesma potência por canal (+10,98 dBm).

A distância alcançada na avaliação reflecte o incremento de potência do canal avaliado, vencendo-se dessa forma a limitação anteriormente imposta pela atenuação na fibra, mantendo-se contudo o sistema WDM implementado abaixo do patamar das não linearidades. A diferença entre as distâncias alcançadas, usando taxas de transmissão diferentes, radica nos diferentes requisitos de sensibilidade no receptor para a mesma taxa de erros ($\leq 10^{-12}$).

Relativamente ao espectro dos sinais verifica-se que, neste ultimo sistema implementado, a potência dos produtos FWM está contida a valores baixos devido ao facto da transferência de potência dos canais originais para os produtos FWM, usando espaçamentos desiguais, não ser tão eficaz como usando-se o mesmo espaçamento (das equações 2-21 e 2-22), condicionando dessa forma a eficiência FWM.

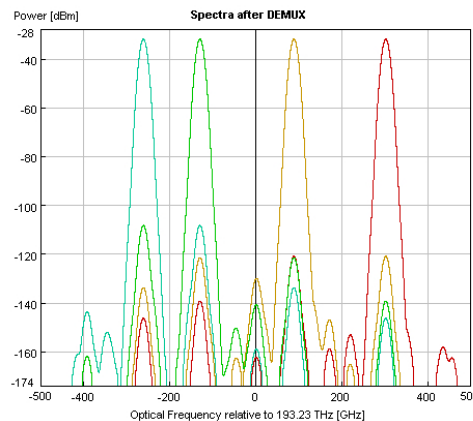


Figura 6-4: Espectro do sinal amostrado após o dispositivo DEMUX num sistema WDM de 4 canais com a mesma potencia e diferente espaçamento entre canais.

A Figura 6-4 mostra o efeito da diafonia, gerada no processo FWM e pela imperfeição do dispositivo WDM_DEMUX. Verifica-se, que contrariamente ao que sucede usando-se o mesmo espaçamento, o efeito da diafonia inter-banda é atenuado, dado que os produtos FWM mais importantes não caem dentro da janela de transmissão do sistema, viabilizando dessa forma a transmissão WDM.

As conclusões a retirar da simulação vão em linha com as anteriormente produzidas no capítulo 5, quando se avaliou o efeito FWM. Ou seja, as fibras DSF embora condicionadas no transporte de sistemas WDM quando usadas perto da região de dispersão nula, podem contudo

transportar esses sistemas, com uma escolha criteriosa, do número de canais e/ou espaçamento entre estes, que era o que se pretendia demonstrar.

Com as avaliações seguinte pretende-se verificar de um ponto de vista meramente teórico e de uma forma sucinta a distância limite de propagação para sistemas de 8 a 80 canais em fibras da norma G.653 da ITU-T [1]. O modelo usado na simulação é semelhante ao da avaliação da transmissão de 4 canais com as adaptações devidas, passando nomeadamente pela utilização de agregados de lasers formando conjuntos de 8 portadoras ópticas CW (num total de 10), as quais vão sendo adicionadas para formar os diferentes sistemas WDM a avaliar. Os dispositivos WDM (MUX – DEMUX) são do tipo AWG. No modelo usou-se um ritmo de transmissão de 2,5 GHz.

Alguns dos critérios mais importantes usados na avaliação são o da $P_{\max} = +17$ dBm (na Tabela 6-21 resumem-se as potências usadas por canal, conforme este critério) e o mesmo espaçamento entre canais ($\Delta_s = 100$ MHz), com o intuito de simplificação das simulações. A avaliação centra-se na frequência óptica 1552,524 nm (193,1 THz) e segue as especificações da recomendação G.692 [3] da ITU-T.

N° <i>canais</i>	P_{ch}		N° <i>canais</i>	P_{ch}	
	(dBm)	(mW)		(dBm)	(mW)
8	7,97	6,26	48	0,19	1,04
16	4,96	3,13	56	-0,48	0,89
24	3,20	2,09	64	-1,06	0,78
32	1,95	1,57	72	-1,57	0,70
40	0,98	1,25	80	-2,03	0,63

Tabela 6-21: Potências ópticas por canal (P_{ch}) conforme o critério $P_{\max} = +17$ dBm.

A modelização da rede óptica tem por base a configuração da Figura 6-1, considerando-se a influência de cada secção (*span*) individual no caminho óptico completo (ligação A>>>F).

A avaliação dos m conjuntos constituídos pelo somatório dos n agregados de canais (com $n = 1, \dots, 10$) de comprimentos de onda que formam o sistema (D)WDM a implementar, processa-se através da amostragem do 1º canal de cada conjunto de portadoras ópticas, ou seja o dispositivo “Channel analyser” usado no programa VPI TransmissionMaker é sintonizado automaticamente nesse comprimento de onda particular (λ_x).

As Tabelas 6-22 e 6-23 caracterizam a transmissão de alguns dos sistemas WDM implementados. Por motivo de simplificação da análise, apenas se mostram os dados correspondentes a sistemas WDM de 8 e 16 canais. Um facto assinalável, que as Tabelas 6-22 e 6-23 mostram, é a degradação da qualidade do sinal no receptor, quando a transmissão dos canais WDM se aproxima da região de dispersão nula. Estão nesta situação os agregados 5 e 6 da Tabela 6-22 e os “Σ agregados” 5 e 6 da Tabela 6-23.

Agregado	λ_c , médio (nm)	P_{rx} (dBm)	BER	L (km)	Margem (dB)
1	1582,018	-25,02	1,79E-13	53,56	2,5
2	1575,367	-25,02	2,21E-13	53,56	2,5
3	1568,772	-25,01	2,01E-13	53,56	2,5
4	1562,232	-25,00	2,74E-13	53,56	2,5
5	1555,747	-25,00	1,21E-12	53,56	2,5
6	1549,315	-24,45	4,97E-12	53,56	2,0
7	1542,936	-25,00	4,41E-13	53,56	2,5
8	1536,609	-25,00	2,06E-13	53,56	2,5
9	1530,334	-25,02	2,89E-13	53,56	2,5
10	1524,110	-25,01	2,39E-13	53,56	2,5

Tabela 6-22: Caracterização da transmissão de um sistema WDM de 8 canais, usando os critérios $P_{max} = +17 \text{ dBm}$ e $\Delta_s = 100 \text{ GHz}$.

Conjunto		λ_c , médio (nm)	P_{rx} (dBm)	BER	L (km)	Margem (dB)
Notação	Agregados					
Σ_1	1 e 2	1578,686	-24,91	5,37E-14	39,06	5,0
Σ_2	2 e 3	1572,063	-24,90	5,20E-14	39,06	5,0
Σ_3	3 e 4	1565,495	-24,89	5,68E-14	39,06	5,0
Σ_4	4 e 5	1558,983	-24,89	6,06E-14	39,06	5,0
Σ_5	5 e 6	1552,524	-24,88	2,74E-13	39,06	5,0
Σ_6	6 e 7	1546,119	-24,85	1,29E-12	39,06	5,0
Σ_7	7 e 8	1539,766	-24,89	6,46E-14	39,06	5,0
Σ_8	8 e 9	1533,465	-24,89	4,69E-14	39,06	5,0
Σ_9	9 e 10	1527,215	-24,90	5,78E-14	39,06	5,0

Tabela 6-23: Caracterização da transmissão de um sistema WDM com 16 canais, usando os critérios $P_{max} = +17 \text{ dBm}$ e $\Delta_s = 100 \text{ GHz}$.

Essa situação é compatível com a caracterização do efeito FWM feita anteriormente, nas secções 2.2.2.4 e 5.4, ou seja, a eficiência FWM, pela transferência de potência dos canais de sinal para os produtos FWM, é favorecida, quando se usa o mesmo espaçamento entre canais, e se transmite junto à região de dispersão nula da fibra, dado os canais permanecerem em fase por mais tempo.

Ainda relativamente ao efeito FWM na Figura 6-5 evidencia-se o comportamento de um sistema WDM de 8 e 16 canais, que são os mais significativos, sob o efeito FWM. No gráfico da figura é visível que a taxa de erros do sinal no receptor se degrada numa janela de comprimentos de onda à volta da região da dispersão nula na fibra.

Contrariamente à metodologia usada anteriormente na transmissão de um sistema WDM com 4 canais, nesta situação a *margem de implementação do sistema* (MIS) é a resultante das perdas de inserção do sistema e da contribuição das diversas penalidades de potência devidas aos efeitos (não)lineares nas fibras ópticas.

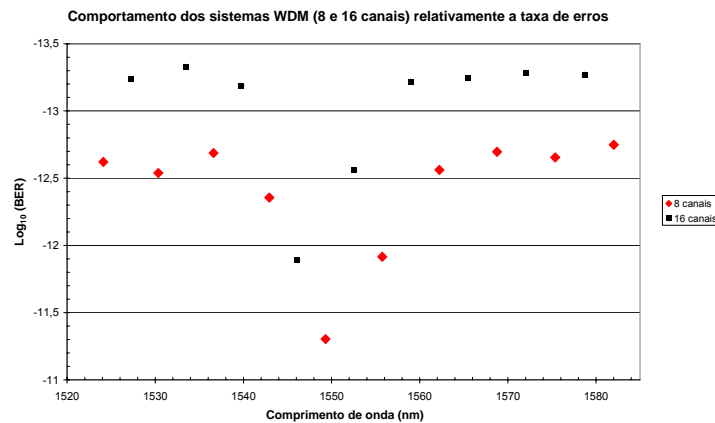


Figura 6-5: Relação da taxa de erros com o comprimento de onda relativamente a sistemas WDM com 8 e 16 canais.

No gráfico da Figura 6-6 evidencia-se o comportamento dos sistemas STM-N implementados em termos das distâncias alcançadas, mantendo-se a potência transmitida por canal abaixo do patamar do efeito das não linearidades. Da análise da figura retira-se de imediato que relativamente a alguns dos sistemas implementados a margem de implementação não cumpre com o objectivo de 6 dB, anteriormente definido.

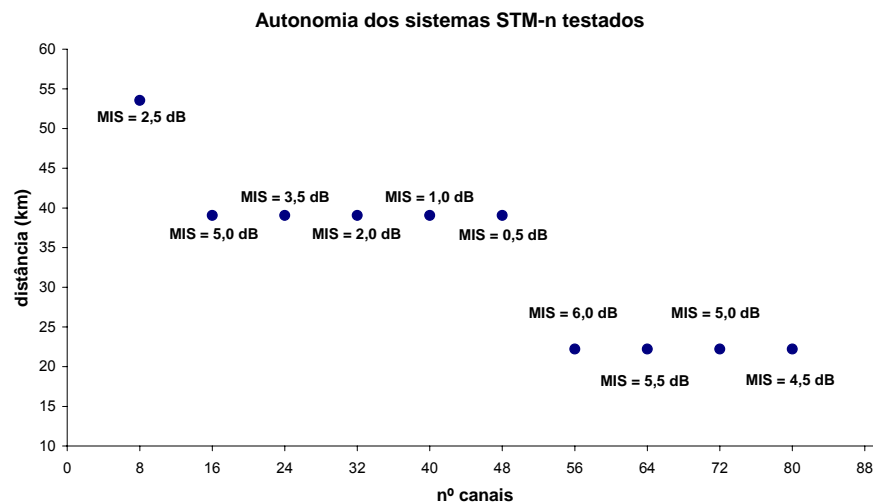


Figura 6-6: Máxima distância alcançada (para um $BER = 10^{-12}$) e correspondente margem de implementação média dos sistemas STM-N implementados.

A margem de implementação insuficiente em alguns dos sistemas WDM implementados poderá ser resolvida mudando o tipo de conectores por outros cuja especificação das perdas de inserção seja menor, ou não sendo possível, anulando as conectorizações através de fusões na fibra, ou, em ultima instância, usando amplificação óptica.

6.3 Optimização da rede óptica: Uma perspectiva diferente

Uma abordagem diferente na optimização da rede óptica em operação é a da concatenação das fibras DSF com outros tipos de fibras monomodo que melhor se adequem, sob o ponto de vista das características geométricas/ópticas. A abordagem pode ainda ser verificada do lado das perdas e/ou do lado da compensação dos efeitos dos níveis baixos de dispersão e na diminuição dos efeitos não lineares.

Na ligação entre fibras ópticas existem sempre alguns mecanismos de perdas que impedem um acoplamento perfeito. Esses mecanismos de perdas são devidos a desalinhamentos (axial, angular e transversal), na variação abrupta do índice de refração (descontinuidade ar-vidro) em conectorizações e, por último, diferentes diâmetros modais do campo (MDF) [16-18].

Dentro das contribuições para as perdas no acoplamento entre fibras, a resultante da diferença entre MDFs não é possível minimizar, dado tratarem-se de parâmetros intrínsecos das fibras. Daqui resulta que o mecanismo de perdas predominante na ligação entre fibras ser o da diferença nos MDFs, conforme ressalta do estudo realizado em 2.2.1.

Para uma avaliação qualitativa das perdas, tendo em conta valores típicos de MDFs, na Tabela 6-24, apresentam-se valores da MDF em alguns tipos de fibras monomodo [10,12], em 1550 nm.

Tipo de fibra	MDF (μm)
SMF	10,5
DSF	8,3
NZDSF	8,4

Tabela 6-24: Valores típicos de MDF em algumas fibras monomodo medidos em 1550 nm.

Da equação (2-6) e em função dos valores de MDF da Tabela 6-24, resulta que as perdas de acoplamento nas combinações de fibras DSF/SMF e DSF/NZDSF (fibras de dispersão deslocada não-nula) são de 0,238 e 0,001, respectivamente. De onde é possível concluir que a concatenação das fibras das normas G.653 [1] e G.655 [11] da ITU-T, sob esse ponto de vista, é a que melhor se adequa.

Relativamente à compensação do baixo nível de dispersão e da diminuição dos efeitos das não linearidades na fibra, paralelamente com o impacto dos custos de implementação dos sistemas de comunicação ópticos, a concatenação entre os diferentes tipos de fibras monomodo referidas anteriormente poderá ser atractiva economicamente, particularmente nas situações em que seja necessário substituir as fibras DSF actualmente existentes.

A título de exemplo, na Figura 6-8 apresenta-se uma solução apontada por alguns autores [10,12,16], como forma de obviar aos problemas associados ao desenvolvimento das não linearidades nos sistemas (D)WDM, onde a transmissão de múltiplos canais, numa mesma fibra, implica grandes densidades de potência por unidade de área, resultando deste processo o incremento dos efeitos não lineares; por exemplo, a SPM e a FWM [16,17].

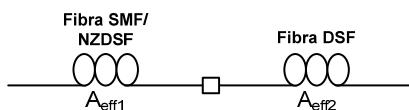


Figura 6-7: Concatenação de tipos de fibras monomodo com diferentes áreas efectivas como forma de diminuir a densidade inicial de potência injectada na fibra, para minimizar o efeito das não linearidades.

Das opções que a Figura 6-7 apresenta, com o intuito de diminuir a densidade inicial da potência injectada na fibra, a mais eficaz, resulta da combinação das fibras, normas G.653 [1] e G.655 [11] da ITU-T, em razão das perdas de acoplamento.

Por outro lado, a combinação de fibras, nas quais as curvas de dispersão são muito diferentes, pode contribuir para a melhoria da banda efectiva de um sistema, pelo princípio da compensação da dispersão [6,8,13], a qual se mostra esquematicamente na Figura 6-8.

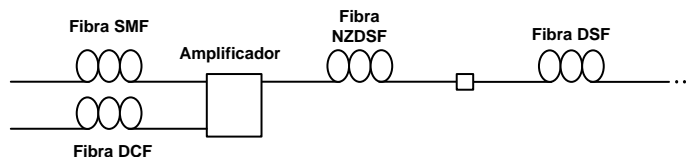


Figura 6-8: Forma de compensação da dispersão usando diferentes tipos de fibras, com determinada função na optimização de um sistema de cominação óptica.

De facto, como é referido na literatura [18], a concatenação de troços sucessivos de fibras das normas G.653 [1] e G.655 [11] da ITU-T, cujos zeros da dispersão se apresentam distribuídos de uma forma irregular, pode contribuir para a redução dos efeitos não lineares em sistemas (D)WDM.

O princípio da compensação, é o que se explica de seguida. Na Figura 6-8, a fibra DSF funciona como referência da dispersão a ser compensada. A dispersão neste tipo de fibras é normalmente negativa para $\lambda < 1548$ nm e positiva para $\lambda > 1548$ nm. A colocação da fibra SMF no início do sistema, dado ter valor positivo, permite compensar os valores negativos da fibra DSF. Da mesma forma a fibra de compensação da dispersão (DCF), por possuir valores negativos de dispersão, permite compensar a dispersão positiva da fibra DSF.

Na mesma figura (6-8) a fibra NZDSF, ao possuir uma maior área efectiva, permite minimizar os efeitos não lineares produzidos, pelo sistema após amplificação [12]. O comprimento de fibra NZDSF necessário para minimizar esses efeitos é o resultante da aplicação da equação (2-12), usada na determinação do comprimento efectivo de interacção das não linearidades na fibra.

6.4 Aspectos mais importantes do estudo dos cenários de optimização

O estudo realizado ao longo deste capítulo teve como grande objectivo, testar no simulador, as fibras DSF, quanto a sua capacidade de transmissão de sistemas de comunicação óptica multicanal. Contudo, era também importante testar esse tipo de fibra, em sistemas monocal a maiores ritmos de transmissão, nomeadamente a 10 e 40 Gb/s, para em termos de balanço final tentar perscrutar os melhores caminhos de rentabilização da infra-estrutura instalada.

Como consequência do atrás afirmado, no estabelecimento de cenários de implementação de sistemas de comunicação ópticos multicanal a abordagem realizou-se em três etapas que se complementam. Essa abordagem teve por base o estudo dos fenómenos que limitam a transmissão dos impulsos ópticos, da amplificação óptica e dos elementos passivos da rede WDM e, iniciou-se, com a implementação de sistemas de comunicação ópticos monocal, com incidência na banda óptica C e centro na frequência óptica 193,1 THz, o que equivale a uma largura de banda = 30 nm (~3,7 THz).

Um dos objectivos importantes das simulações implementadas era verificar dentro da janela de transmissão dos amplificadores ópticos, cuja especificação temos disponível, onde é “prático” a implementação de sistemas D(WDM). “Prático” nesta situação significa a janela de comprimentos de onda, para os quais as fibras DSF, possuam valores de dispersão, suficiente elevados, que compensem o efeito FWM, possibilitando a implementação de sistemas WDM, sem recurso a mecanismos de compensação (pela concatenação com outros tipos de fibras monomodo), os quais foram abordados sucintamente na secção anterior.

Numa primeira fase, usou-se uma situação mista de espaçamento não uniforme de canais e de valores da dispersão compatíveis com fibras de dispersão deslocada. Verificou-se que centrando o espectro da transmissão em comprimentos de onda afastados da região da dispersão nula na fibra se conseguem alcançar maiores distâncias. A esses comprimentos de onda correspondem diferentes coeficientes de dispersão.

Um segundo objectivo das simulações foi verificar a máxima distância (teórica) alcançável por sistemas (D)WDM, optando-se agora por uma estratégia diferente na configuração dos sistemas

WDM implementados nas simulações, por razões de ordem prática, ou seja, limitando a potência de transmissão por canal, abaixo do patamar das não linearidades e usando um espaçamento uniforme entre canais.

Verificou-se que embora os canais (ou agregados de canais), transmitidos perto da região da dispersão nula, fossem mais afectados que os mais afastados dessa região, se conseguiu um certo equilíbrio, pelo alcance da mesma distância, muito embora com a limitação já referida anteriormente.

6.5 Conclusões

As principais conclusões a reter do estudo realizado condensam-se na tabela resumo seguinte.

Transmissão		Pontos favoráveis	Pontos desfavoráveis
Tipo	Ritmo (Gb/s)		
Monocanal	2,5	Solução já muito testada nas redes ópticas.	Nada a assinalar.
	10	Autonomia do sistema usando potências não muito elevadas (+15 dBm), ~100 km.	Controlo dos níveis da PMD.
	40	Autonomia do sistema usando potências não muito elevadas (+15 dBm), ~54 km.	Controlo dos níveis da SPM e da PMD. Pouco experiência na operação dos sistemas.
Multicanal (2,5 Gb/s)	4 canais	Usando espaçamento não uniforme conseguem-se distâncias consideráveis, ~60 km.	Diafonia pouco severa.
	8 canais	Na solução testada conseguiu-se uma autonomia de ~50km.	Controlo do efeito da diafonia.
	> 8 canais	Maior capacidade de informação.	Sistemas muito limitados pela diafonia e na distância.

Tabela 6-25: Tabela resumo da avaliação das soluções mono- multi canal testadas em sistemas não amplificados.

Como conclusão do estudo realizado e, como é referida na literatura [5-8], a opção da transmissão multicanal, usando-se um ritmo de transmissão baixo (2,5 Gb/s, por exemplo) e potências não muito elevadas por canal, traduz-se numa vantagem competitiva relativamente a opção monocanal a ritmos bem mais elevados (por exemplo, a 40 Gb/s), por efeito das não linearidades na fibra, e da PMD.

Ou seja, levando em linha de conta que, o efeito FWM é minimizado, combinando-se um número reduzido de canais, espaçamentos não uniformes e potências baixas por canal, ficando também por esse facto o sistema abaixo do patamar dos efeitos não lineares, a opção multicanal, revela-se ser uma boa opção para o *upgrade* da rede óptica instalada, sendo contudo necessário proceder a um estudo preliminar que permita caracterizar mais eficazmente o perfil da PMD nas secções da rede óptica onde se pretenda futuramente fazer esse *upgrade*.

Na mesma linha da análise, a opção de *upgrade* para um ritmo de transmissão de 10 Gb/s, revela-se igualmente uma boa opção, com a limitação já anteriormente referida, relativamente à necessidade de uma melhor caracterização dos níveis da PMD na rede.

Ressalta igualmente do estudo realizado, que na necessidade de mudança da norma da fibra, por imperativos da operação e/ou manutenção da rede, a solução que melhor se adequa do ponto de vista óptico, é a opção pelas fibras da norma G.655 [11]. A opção pelas fibras dessa norma, além de permitir fasear a mudança da fibra, dada a compatibilidade óptica, tem ainda a vantagem, que a sua concatenação com as fibras de dispersão deslocada, em pontos estratégicos da rede, favorecerem a eliminação dos efeitos das não linearidades, nestas últimas, constituindo-se como uma outra alternativa para a optimização da rede óptica em operação.

Por último e, favorecendo a opção da mudança da norma da fibra, acresce que, até meados de 1995, os fabricantes das fibras não controlavam eficazmente os níveis da PMD nas fibras [10], pelo que também pela via da compensação da PMD, a opção pelas fibras G.655 [15] se apresenta atractiva, uma vez que poderia solucionar com eficácia os problemas relacionados com as não linearidades e a PMD, nas fibras actualmente instaladas, constituindo-se num outro possível desenvolvimento futuro do presente trabalho.

6.6 Referências

- [1] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable”, Rec. G.653, 1997.
- [2] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for single channel STM-64, STM-256 systems and other systems with optical amplifiers”, Rec. G.691, 2000.
- [3] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for multi-channel systems with optical amplifier”, Rec. G.692, 1998.
- [4] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), “Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy”, Rec. G.957, 1995.
- [5] S. Shimata e H. Ishio, “Optical Amplifiers and their Applications”, Wiley, Chichester, 1994.

- [6] C. R. Giles, M. Newhouse, J. Wright e K. Hagimoto, "Systems and Networks Applications of Optical Amplifiers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, 1995.
- [7] M. J. O'Mahoney, "Semiconductor laser optical amplifier for use in future fiber systems", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 6, pp. 531-544, 1988.
- [8] Govind P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems", 3ª Edição, John Wiley & Sons, Inc., Nova Iorque, 2002.
- [9] R. Ramaswami e P. Humblert, "Amplifier induced crosstalk in multichannel optical networks", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 8, pp. 1882-1896, 1990.
- [10] Ashwin Gumaste e Tony Antony, "DWDM Network Designs and Engineering Solutions", *Networking Technology*, Cisco Press, 2002.
- [11] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), "Characteristic of non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable systems with optical amplifiers", Rec. G.655, 2000.
- [12] M. Jinno, "First demonstration of 1580 nm wavelength band WDM transmission for doubling usable bandwidth and suppressing FWM in DSF", *Electronic Letters*, nº 10, V.33, p. 887, 1997.
- [13] T. Sakamoto, "Wide wavelength band (1535 nm – 1560 nm and 1574 nm – 1600 nm), 28 x 10 Gb/s WDM transmission over 320 km Dispersion-Shifted Fiber", *Electronics Letters*, nº 4, V.34, p. 392, 1998.
- [14] ITU-T (Telecommunication Standardization Sector of ITU), "Characteristics of a single-mode optical fibre cable", Rec. G.652, 2000.
- [15] J. E. Midwinter, "Optical fiber for transmission", John Wiley, Nova Iorque, 1979.
- [16] S. E. Miller e A. G. Chynoweth, "Optical fiber telecommunications", Academic Press, Nova Iorque, 1979.
- [17] T. Okoshi, "Optical fibers", Academic Press, Orlando, 1982.
- [18] John Senior, "Optical fiber communications: principles and practice", Prentice-Hall. Londres, 1985.

Capítulo 7

Conclusões e trabalhos futuros

7.1 Considerações finais

Esta tese trata a problemática da optimização de uma rede óptica em operação e com esse propósito os capítulos foram encadeados ao longo da dissertação de forma a dar corpo a ideias chave em torno do objectivo principal. Essas ideias foram postas a prova no último capítulo da dissertação onde se estabeleceram cenários de optimização da rede óptica.

No capítulo 2, fez-se uma breve apresentação da propagação dos impulsos na fibra óptica mostrando-se de uma forma sucinta as interacções que ocorrem num campo electromagnético no interior de uma fibra óptica monomodo através da equação da fibra. Com recurso a simulações demonstraram-se os efeitos de duas características lineares importantes de uma fibra óptica, a atenuação e a dispersão.

No mesmo capítulo 2 estudaram-se os factores que concorrem para afectar a transmissão de sinais num fibra óptica monomodo, os efeitos lineares e não lineares. Teve-se como principal objectivo caracterizar o melhor possível dentro desses efeitos, os que são particularmente limitantes a propagação dos impulsos em fibras ópticas de dispersão deslocada, o efeito da mistura de quatro ondas e da dispersão dos modos de polarização. A avaliação desses efeitos foi feita na base da discussão teórica e com o recurso a simulações. Particular relevo foi dado à análise e medição da dispersão e ao estudo dos efeitos não lineares em fibras ópticas de Sílica.

No capítulo 3, apresentaram-se as interfaces do sistema WDM relevantes com as simulações para optimização da rede óptica e procedeu-se a um estudo sucinto dos amplificadores ópticos do tipo semiconductor e de fibra dopada. A amplificação óptica foi usada ao longo do capítulo 6, na avaliação de soluções tecnológicas com base em sistemas monocanal.

Ainda no capítulo 3, analisaram-se os elementos passivos das redes WDM; acopladores, filtragem e multiplexagem óptica, os quais foram aplicados, ao longo da segunda etapa do estudo

dos cenários de optimização da rede (numa perspectiva multicanal), realizada ao longo do capítulo 6.

No capítulo 4 apresentaram-se de uma forma detalhada as principais metodologias e técnicas de medição de campo usadas na avaliação e aceitação das redes ópticas. Teve-se como preocupação principal orientá-las o mais possível para as fibras de dispersão deslocada uma vez que a rede óptica a optimizar é constituída massivamente por esse tipo de fibra.

No capítulo 5 apresentaram-se detalhadamente os valores obtidos em medições de campo, fazendo uma comparação, sempre que os dados disponíveis o permitissem, dos resultados obtidos mais recentemente com os realizados no período pós-instalação, que ocorreu em 1996. Ficou evidente dessa avaliação que as fibras ópticas não apresentam sinais de envelhecimento e não mostram vestígios de contaminação por infiltração de água. Neste capítulo fez-se ainda uma discussão breve sobre dois tipos de conectorizações; FC/PC e FC/APC tendo-se concluído que para estas últimas os valores das perdas de inserção e de retorno são significativamente melhores.

O capítulo 6 foi dedicado ao estabelecimento de cenários para a optimização da rede óptica em operação, fazendo-se de alguma forma o contraponto das soluções de redes monocal e das redes multicanal, relevando-se os seus aspectos mais positivos e menos positivos. Em concreto a avaliação realizada para a implementação de sistemas multicanal considera-se de uma importância acrescida uma vez que tratando-se de uma rede óptica constituída por fibras ópticas de dispersão deslocada esta abordagem teria sempre obrigatoriamente de ser realizada.

Ainda no Capítulo 6 abordou-se de uma forma sucinta a optimização da rede sob um ponto de vista diferente, ou seja, verificando em que medida a concatenação das fibras DSF com outro tipo de fibras mais compatíveis do ponto de vista geométrico/óptico, é uma solução viável de ser implementada, visando dois aspectos fundamentais; o económico, dado o custo elevado da fibra DSF e da minimização dos efeitos das não linearidades, mantendo-se a estabilidade e a coerência tecnológica, tendo sido verificado que este objectivo é melhor alcançado com a concatenação das fibras DSF com as fibras do tipo NZDSF.

7.2 Desenvolvimentos futuros

Partindo da premissa que nenhum trabalho de engenharia está verdadeiramente concluído, uma vez que é sempre possível optimizá-lo, reestruturá-lo ou até fazer diferente, julgamos contudo ser possível a partir da base que esta tese propõe e, que nalguns casos sugere fortemente tendências para optimização da rede óptica em operação, existem alguns tópicos que merecem uma análise e reflexão futura:

- 1) Aprofundamento do estudo da viabilidade da implementação de soluções tecnológicas baseadas na transmissão de sinais ópticos a 40 Gb/s.
- 2) Complementarmente com o ponto anterior fazer uma avaliação real no campo relativamente a transmissão de sinais a esse ritmo de transmissão.
- 3) Em contraponto com o estudo proposto nos dois pontos anteriores verificar se é mais eficiente do ponto de vista tecnológico e/ou económico, transmitir sinais a 40 Gb/s ou se por outro lado, essa eficiência e/ou rentabilidade é conseguida com a implementação de soluções tecnológicas do tipo WDM.
- 4) Estudar o impacto da expansão desta rede quando são utilizados outros tipos de fibras como as SMF padrão e a possibilidade de intercalar este tipo de troços para minimizar efeitos que dependam da baixa dispersão das DSF.

Anexo A **Recomendações mais importantes para fibras ópticas cabladas**

Neste anexo apresenta-se resumidamente e em forma de tabela alguns dos requisitos e características mais importantes para fibras cabladas de dispersão deslocada. Os valores que a Tabela A-1 apresenta derivam directamente da recomendação G.653 (*Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable*) da ITU-T e, deverão servir de guia prático para aceitação de fibras cabladas. Contudo deve ser notado que actualmente os fabricantes de fibras ópticas conseguem melhores valores de atenuação que os especificados na recomendação da ITU-T. Tipicamente os valores actuais da atenuação das fibras ópticas cabladas, são da ordem dos 0,35 dB/km em 1310 nm e de 0,20 dB/km em 1550 nm. Isto implica nomeadamente, que podem ser usados critérios mais apertados na aceitação de uma rede óptica, especificamente no que diz respeito às perdas totais de inserção.

Característica	Valor tolerado
Atenuação máxima (fibra cablada)	0,5 dB/km em 1310 nm e 0,25 dB/km em 1550 nm
Uniformidade da atenuação	Não deverão existir pontos de descontinuidade maiores que 0,1 dB em 1310 nm ou em 1550 nm.
Dispersão	$\geq -25\text{ps/nm.km}$ em 1310 nm e $\leq 2,7\text{ps/nm.km}$ em 1550 nm
Coefficiente máximo da PMD (fibra cablada)	$0,5\text{ ps.km}^{-1/2}$ em 1310 e 1550 nm
Diâmetro modal do campo	$6,5 \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ em 1310 nm e $8,1 \pm 0,65\text{ }\mu\text{m}$ em 1550 nm
Comprimento de onda de corte (λ_{cc})	Fibra não cablada ≥ 1120 e ≤ 1350 nm. Para fibra cablada ≤ 1260 nm
Abertura numérica	0,17 (nominal) em 1310 nm
Inclinação de dispersão nula	$\leq 0,085\text{ ps}/(\text{nm}^2.\text{km})$
Comprimento de onda de dispersão nula	≥ 1535 e ≤ 1565 nm
Diâmetro do núcleo	7,0 μm (nominal)
Diâmetro da bainha	$125,0 \pm 1\text{ }\mu\text{m}$
Não circularidade da bainha	$\leq 2\%$. Definido como: $[1 - (\text{diâmetro mínimo da bainha} / \text{diâmetro máximo da bainha}) \times 100]$
Bainha / núcleo <i>Off-Set</i>	$\leq 1,0\text{ }\mu\text{m}$
Desempenho quanto a curvaturas	Perdas inferiores a 0,2 dB em 1550 nm

Tabela A-1: Especificações principais para cabos de fibras ópticas da norma G.653 (Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable) da ITU-T.

Anexo B Principais metodologias usadas na medição das redes ópticas

As metodologias apresentadas na Tabela B-1 podem ser usadas indistintamente na certificação de uma rede óptica. Deverá contudo notar-se que muito embora os critérios de aceitação possam diferir de uma ligação óptica para outra, a adopção de uma metodologia (ou técnica de medição) em detrimento de outra deverá ser pesada tendo em atenção os resultados esperados e as tecnologias a usar na implementação da rede óptica ou até do crescimento esperado da mesma rede.

Medição	Metodologias	Gama (λ) (valores em nm)	Apresentação de resultados
Perdas totais	IEC 793-1-C1B ^[1] IEC 793-1-C4 ^[2] EN/CEI 60793-1-40 (B) ^[3]	1310 e 1550	Perdas; média e desvio padrão em dB
Atenuação espectral	IEC 793-1-C1B ^[1] EN/CEI 60793-1-40 (B) ^[3]	1250 a 1650, com incrementos de 5 nm	Coefficiente de atenuação em dB/km e gráfico da atenuação espectral $\alpha(\lambda)$
Reflectometria óptica	IEC 793-1-C1C ^[4] EN/CEI 60793-1-40 (B) ^[3]	1310 e 1550	Traço do OTDR, conjuntamente com a tabela de eventos
Perdas de Retorno	EN/CEI 61300-3-6 (Procedimento 4.1) ^[5]	1310 e 1550	Em forma de tabela com as duas medições unidireccionais e média, em dB
Dispersão Cromática	IEC 793-C5A ^[6] IEC 793-C5B ^[7] IEC 793-1-C5C ^[8] EIA RS-455-169 ^[9]	1280 a 1350 e 1450 a 1650, com incrementos de 5 nm	Coefficiente de dispersão (ps/nm.km), o comprimento de onda no ponto de dispersão nula e o declive no ponto de dispersão nula
PMD	IEC TS 61941 (método B ou C) ^[10,11]	1310 e 1550	PMD nos dois sentidos unidireccionais e o valor médio em ps.km ^{-1/2}

Tabela B-1: Resumo das principais metodologias para aferição da qualidade de uma rede óptica.

Referências

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Attenuation – Insertion loss technique”, IEC 793-1-C1B, 1992. Actualmente com a referência IEC 60874-1, Método 4.4.7, 1999.
- [2] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Transmitted or radiated light power, IEC 793-1-C4, 1992. Actualmente com a referência IEC 60747-5-3, 1997.

- [3] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Attenuation – Backscattering technique”, EN/IEC 60793-1-40 (Método B), 2001.
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Attenuation – Backscattering technique”, IEC 793-1-C1C, 1992. Actualmente com a referência IEC EN/IEC 60793-1-40 (Método C), 2001.
- [5] International Electrotechnical Commission (IEC), Fibre optic interconnecting devices and passive components - Basic test and measurement procedures - Part 3-6: Examinations and measurements – “Return loss”, IEC 61300-3-6 (Procedimento 4.1), 2005.
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures - Chromatic dispersion – Phase-shift technique”, IEC 793-1-C5A, 1992. Actualmente com a referência IEC 60793-1-42 (Método A), 2001.
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion – Spectral group delay measurement in time domain”, EN/IEC 607930-1-42 (Método B), 2004.
- [8] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – Chromatic dispersion – Differential phase-shift technique”, EN/IEC 607930-1-42 (Método C), 2004.
- [9] Electronic Industries Association (EIA), “Chromatic dispersion measurement of optical fibers by the phase shift method”, RS-455-169, 1992.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – “Polarization mode dispersion measurement techniques for single-mode optical fibres – Interefometric technique“, IEC/TS-61941 (Método C), 2000.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), “Measurement methods and test procedures – “Polarization mode dispersion measurement techniques for single-mode optical fibres – Jones matrix eigen-analyses/state of polarization technique“, IEC/TS-61941 (Método B), 2000.

Anexo C Recomendações mais importantes para redes ópticas ópticas

Nas Tabelas C-1 e C-2 apresentam-se resumidamente alguns dos requisitos mais importantes para ligações ópticas. Os requisitos visam a implementação ou *upgrade* de sistemas SDH e/ou WDM já em operação.

Parâmetro	Recomendação	Valor tolerado
Perdas e reflectância em conectores, pigtails e juntas	Telcordia, GR-1312-CORE ^[1]	R7-79 [361] – O valor de uma reflectância discreta visto por uma porta de um elemento de rede óptico deverá ser menor que -27 dB. O7-80 [362] – O valor de uma reflectância discreta visto por uma porta de um elemento de rede óptico deverá ser menor que -40 dB.
	Telcordia, GR-326-CORE ^[2]	Requerimento – Perda máxima vista por uma população de conectores ópticos $\leq 0,5$ dB. Perda média vista por uma população de conectores $\leq 0,3$ dB. Objectivo – Perda máxima vista por uma população de conectores ópticos $\leq 0,3$ dB. Perda média vista por uma população de conectores $\leq 0,2$ dB. Requerimento – Reflectância máxima vista por um conector ≤ -40 dB. Requerimento condicional – Reflectância máxima vista por um conector ≤ -55 dB (aplicações do tipo vídeo analógico). Objectivo condicional – Reflectância máxima vista por um conector ≤ -60 dB (aplicações do tipo vídeo analógico).
	TIA /EIA-568 B.3 ^[3]	Juntas mecânicas ou por fusão não deverão ter perdas maiores que $0,3$ dB ^[1] . Juntas em fibras monomodo deverão ter um ORL melhor que 26 dB para aplicações gerais. Para aplicações de maior largura de banda como CATV o ORL deverá ser melhor que 55 dB.
Atenuação óptica	TIA /EIA-455-61A ^[4] TIA /EIA-455-78B ^[5]	0,25 dB/km em 1550 nm 0,25 dB/km em 1600 nm (máximo de 0,5 dB por conector numa ligação óptica adicionalmente)
¹ O valor tolerável de perdas bidireccionais em juntas actualmente é de 0,1 dB.		

Tabela C-1: Resumo das principais metodologias para aferição da qualidade de uma rede óptica.

Perdas admissíveis em fibra óptica e elementos discretos.

Parâmetro	Recomendação	Valor tolerado
Optical Return Loss (ORL)	Bellcore GR-1312-CORE [1]	Para o objectivo de -40 dB assume-se que todos os componentes são de instalação recente e estão de acordo com as recomendações mais recentes da Telcordia. Testes realizados em diferentes redes ópticas comprovam que o valor expectável de ORL deverá situar-se entre -30 a -35 dB. Quando o valor de ORL cai abaixo de -30 dB deverá proceder-se a inspecção e limpeza dos conectores. Componentes com defeito podem ser facilmente detectados com o recurso a um OTDR. A adesão a estes requerimentos restritos permite que os equipamentos trabalhem num regime mais amplo de tolerância à introdução de reflectâncias futuras num percurso óptico, evitando igualmente possíveis degradações ou falhas de serviço como resultado destas ocorrências.
Dispersão Cromática	TIA /EIA-455-175A [6]	Dispersão cromática: 0,1 a 6,0 ps/nm.km no intervalo entre 1530 a 1565 nm (Banda C) 4,0 a 8,6 ps/nm.km no intervalo entre 1565 a 1620 nm (Banda L)
		Inclinação da dispersão: 0,045 ps/nm ² .km
Coeficiente de PMD	TIA /EIA-455-113 [7]	Coeficiente 1ª ordem: 0,5 ps/km ^{1/2} em 1550 nm Coeficiente de 2ª ordem: 0,2 ps/nm.km
	TIA/EIA-455-122A [8] TIA/EIA-455-124 [9]	Coeficiente de 2ª ordem: 0.2 ps/nm.km

*Tabela C-2: Resumo das principais metodologias para aferição da qualidade de uma rede óptica.
Valores toleráveis de ORL, de Dispersão Cromática e de PMD.*

Referências

- [1] Telcordia Technologies, Inc., Industry Requirements and Standards (RS), “Generic Requirements for Optical Fiber Amplifiers and Proprietary Dense Wavelength-Division Multiplexed, Section 7.9.3 – Discrete reflectance”, GR-1312-CORE, 1999.
- [2] Telcordia Technologies, Inc., Industry Requirements and Standards (RS), “Generic Requirements for Singlemode Optical Connectors and Jumper Assemblies”, Section 4 - Connector Tests and Criteria”, GR-326-CORE, 1999.
- [3] Telecommunications Industry Association (TIA), “Commercial Building Telecommunications Cabling Standard - Part 1: General Requirements - Addendum 3 - Supportable Distances and Channel Attenuation for Optical Fiber Applications by Fiber Type”, ANSI/TIA/EIA-568-B.1-3, 2003.
- [4] Telecommunications Industry Association (TIA), “Fiber Optic Test Procedure – Measurement of Fiber or Cable using an OTDR”, FOTP-61, ANSI/TIA/EIA-455-61A, 2000.

- [5] Telecommunications Industry Association (TIA), “Fiber Optic Test Procedure – Spectral attenuation Cutback Measurement for Single-Mode Optical Fibers”, FOTP-78, ANSI/TIA/EIA-455-78B, 2002.
- [6] Telecommunications Industry Association (TIA), “Fiber Optic Test Procedure – Chromatic Dispersion Measurement of Singlemode Optical Fibers by the Differential Phase-Shift Method”, FOTP-175, ANSI/TIA/EIA-455-175A, 1992.
- [7] Telecommunications Industry Association (TIA), “Fiber Optic Test Procedure – Polarization-Mode Dispersion Measurement of Singlemode Optical Fibers by the Fixed Analyzer Method”, FOTP-113, ANSI/TIA/EIA-455-113-96, 2001.
- [8] Telecommunications Industry Association (TIA), “Fiber Optic Test Procedure – Polarization-Mode Dispersion Measurement for Singlemode Optical Fibers by Interferometry”, FOTP-124, ANSI/TIA-455-124, 1999.

Lista de Figuras

Figura 2-1: Raio de luz incidente com um ângulo menor ou igual ao ângulo de abertura do cone de aceitação ($\theta \leq \alpha$) propaga-se pela fibra [2].....	6
Figura 2-2: Representações do campo eléctrico (a) e do MDF (b).....	8
Figura 2-3: Exemplos de magnitude da dispersão em vários tipos de fibra monomodo [2].....	9
Figura 2-4: Montagem para avaliação da penalidade resultante do efeito da dispersão.	10
Figura 2-5: Penalidade resultante do efeito da dispersão cromática em fibras ópticas monomodo.	11
Figura 2-6: Representação de um diagrama de olho onde se destacam os principais parâmetros extraíveis da sua observação [16].	12
Figura 2-7: Representações de diagrama de olho correspondentes: em a) a uma taxa de 10^{12} e em b) a uma taxa de erros de 10^{-3}	12
Figura 2-8: Efeito da atenuação num sinal óptico, avaliado em termos da potencia óptica que chega ao receptor versus taxa de erros, com $D = 0,1$ ps/nm-km, num comprimento de fibra de 130 km.	13
Figura 2-9: Comportamento de dois tipos de fibra monomodo em função da atenuação e da dispersão: a) SMF e b) DSF.....	13
Figura 2-10: Representação esquemática da variação do estado da polarização de um impulso óptico quando se propaga numa fibra com birrefringência variável ao longo do seu comprimento [2].....	14
Figura 2-11: Montagem para simulação do efeito da PMD na propagação de impulsos NRZ numa fibra óptica monomodo de dispersão deslocada.	15
Figura 2-12: Diagrama temporal; a) Para uma PMD de $0,5$ ps/km $^{1/2}$ e b) Para uma PMD de 5 ps/km $^{1/2}$	15
Figura 2-13: Representação do alargamento espectral de um impulso devido ao efeito SPM [2]..	19
Figura 2-14: Ilustração do efeito da diafonia num componente das redes WDM (comutador óptico).....	21
Figura 2-15: Penalidade de potência para sistemas WDM (4, 8 e 16 canais) devida a diafonia dentro de banda (linhas a cheio) e fora de banda (linhas a pontilhado).	21
Figura 2-16: Ilustração do efeito FWM.....	23
Figura 2-17: Modelo usado na avaliação do efeito FWM, transmitindo 4 canais com espaçamento de 50 GHz, com centro na frequência óptica 193,1 THz, a um ritmo de 10 Gb/s.	24

Figura 2-18: Espectro de frequência, visualizado num sistema WDM de 4 canais, usando espaçamento igual entre canais (50 GHz), após percorrerem 100 km de fibra DSF.	24
Figura 2-19: Alinhamento e combinação dos canais originais que originaram os produtos FWM relativamente ao espectro de frequências da Figura 2-18, com centro em 193,1 THz.	25
Figura 2-20: Representações de diagramas de olho dos canais originais: (a) 2 e (b) 3, após os sinais percorrem 100 km de fibra DSF.	26
Figura 2-21: Diagramas de olho dos canais; (a) 2 e (b) 3, após os sinais percorrerem 2,5 km de fibra DSF.	26
Figura 3-1: Representação de um sistema de interfaces de linha óptica [1].	34
Figura 3-2: Princípio básico de funcionamento de um EDFA [7].	37
Figura 3-3: Comparação entre um diodo laser e um amplificador do tipo SOA [8].	37
Figura 3-4: Dependência típica do ganho de simples passagem na potência de um sinal óptico de entrada para um ganho de sinais fracos com $G_0 = 30$ dB [7].	40
Figura 3-5: Método passivo para controlo do ganho no qual o amplificador funciona na região de saturação com um nível de sinal nominal de entrada, $P_{s,in}^{nom}$ [2].	40
Figura 3-6: Grelha de comprimentos de onda corresponde a banda C (convencional) [7].	42
Figura 3-7: Acoplador bicónico de fibra fundida.	42
Figura 3-8: Multiplexador de quatro canais baseado no MZI.	45
Figura 3-9: Exemplo de um AWG utilizado como dispositivo WDM; em a) diagrama de blocos e em b) geometria de um acoplador estrela.	45
Figura 3-10: Exemplo de um OADM: os comprimentos de onda λ_1 e λ_3 são extraídos e de novo adicionados. Os restantes comprimentos de onda passam.	47
Figura 3-11: Exemplo de uma OADM: apenas uma das bandas é sujeita a extracção e adição de canais.	47
Figura 3-12: Exemplo da operação de adição e de subtracção num OADM do tipo série.	48
Figura 4-1: Exemplo de uma curva de retro dispersão unidireccional (traço do OTDR em 1550nm).	54
Figura 4-2: Parâmetros extraíveis de um evento reflectivo medido com um OTDR.	56
Figura 4-3: Dados experimentais da normalização dos dados do atraso espectral de grupo em fibras monomodo: (a) SMF e (b) DSF, respectivamente.	62
Figura 4-4: Curva do desvio de fase obtida na avaliação de D em fibras SMF (a) e em fibras DSF (b), respectivamente.	62
Figura 4-5: Coeficiente de dispersão cromática medido em fibras SMF e em fibras DSF, no intervalo de comprimentos de onda da Figura 4-3. Os pontos a cheio correspondem a valores efectivamente medidos e as linhas servem como auxiliar de visualização.	63

<i>Figura 4-6: Representação vectorial, numa esfera de Poincaré, da dispersão devido a PMD.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4-7: Representação de um interferómetro básico de Michelson.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4-8: Interferograma de um padrão de franjas medido em: a) modos de acoplamento fracos e b) modos de acoplamento fortes.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4-9: Interferograma de um padrão de franjas obtido com o método de auto-correlação para o modo de acoplamento forte.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4-10: Caracterização dos termos aleatórios do interferograma da Figura 4-9 (a pontado na figura), sem o pico central de auto-correlação.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4-11: Exemplo de uma configuração para medição do valor das perdas totais de retorno [3].</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5-1: Ligação típica de circuitos ópticos ponto-a-ponto onde poderão existir até N-1 estações intermédias num determinado caminho óptico.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5-2: Curva unidireccional de reflectometria vista da fibra 1 (na estação E), com retorno pela fibra 2 (na estação F).</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5-3: Disposição da secção da rede óptica avaliada quanto aos níveis de ORL e das reflectâncias discretas.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5-4: Curva unidireccional vista pela fibra 7 com retorno pela fibra 8.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5-5: Configuração de teste usada na medição da dispersão cromática.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5-6: Perfil da dispersão cromática das fibras 1-2. Os quadrados a cheio representam comprimentos de onda medidos, os restantes valores foram obtidos por extrapolação.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 5-7: Configuração dos caminhos ópticos usados na medição da PMD: de teste entre as estações “A” e “B” e concatenado entre as estações “A” e “C”.</i>	<i>86</i>
<i>Figura 5-8: Variação da PMD obtida durante os quatros dias de medição no caminho óptico concatenado; em a) a 1550 nm e em b) a 1310 nm. A variação da temperatura ocorrida durante o período amostral é indicada pelas barras verticais.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 5-9: Variação da PMD obtida durante os três dias de medição no caminho óptico de teste; em a) a 1550 nm e em b) a 1310 nm. A variação da temperatura ocorrida durante o período amostral é indicada pelas barras verticais.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5-10: Variação da temperatura ao longo do tempo das medições.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-11: Disposição dos equipamentos de medida usados na avaliação do efeito FWM.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 5-12: Diagrama de blocos relativo ao sistema de medição da FWM e principais parâmetros dos Lasers CW.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5-13: Espectro de comprimentos de onda obtido na primeira medição da avaliação do comprimento de onda de dispersão nula.</i>	<i>91</i>

<i>Figura 5-14: Dispersão e linha de tendência do valor médio da potência média recebida nos produtos FWM, em função da variação do comprimento de onda do canal de bombagem. ..</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-15: Espectro de comprimentos de onda obtido na primeira medição da avaliação do efeito FWM. A numeração aposta significa; ch1 a ch4, os canais originais e, um número dentro de um círculo, os produtos FWM mais significativos.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5-16: Alinhamento e combinação dos canais originais que originaram os produtos FWM relativamente ao espectro da Figura 5-16. Os produtos FWM a ponteados na figura têm níveis de potência não perceptível pelo OSA.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5-17: Valores medidos na rede óptica relativamente ao comprimento de onda nos canais originais e nos produtos FWM, em função da variação da temperatura.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-18: Linha de tendência da potência recebida nos canais originais e nos produtos FWM em função da variação da temperatura.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5-19: Valores médios e desvio padrão correspondentes ao comprimento de onda, verificados nos canais originais e nos produtos FWM.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5-20: Valores médios e desvio padrão correspondentes a potência óptica recebida, nos canais originais e nos produtos FWM.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 5-21: Variação e linha de tendência de λ_0 e da eficiência FWM, em função da temperatura.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5-22: Valores (médios) de eficiência FWM observados nos produtos da Figura 5-15, para uma temperatura ambiente de 15 °C.</i>	<i>98</i>
<i>Figura 6-1: Modelo usado no simulador para avaliação da rede óptica da Tabela 5-1. O índice (r) apostado à identificação das estações significa o retorno pela fibra 2.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 6-2: Espectro do sinal antes e após amplificação, num sistema monocal a 10 Gb/s: a) usando amplificação em linha, b) usando pré-amplificação.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 6-3: Espectro do sinal antes e após amplificação, num sistema monocal a 40 Gb/s: a) usando amplificação em linha, b) usando pré-amplificação.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 6-4: Espectro do sinal amostrado após o dispositivo DEMUX num sistema WDM de 4 canais com a mesma potência e diferente espaçamento entre canais.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 6-5: Relação da taxa de erros com o comprimento de onda relativamente a sistemas WDM com 8 e 16 canais.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 6-6: Máxima distância alcançada (para um BER = 10^{-12}) e correspondente margem de implementação média dos sistemas STM-N implementados.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 6-7: Concatenação de tipos de fibras monomodo com diferentes áreas efectivas como forma de diminuir a densidade inicial de potência injectada na fibra, para minimizar o efeito das não linearidades.</i>	<i>123</i>

*Figura 6-8: Forma de compensação da dispersão usando diferentes tipos de fibras, com
determinada função na otimização de um sistema de cominação óptica. 123*

Lista de Tabelas

<i>Tabela 3-1: Caracterização das aplicações de acordo com as distâncias a vencer.</i>	32
<i>Tabela 3-2: Codificação das interfaces ópticas baseada no tipo e código de aplicação.</i>	32
<i>Tabela 3-3: Principais parâmetros especificados nas recs. G.957 [1], G.691 [3] e G.692 [6] da ITU-T relativamente ao transmissor.</i>	33
<i>Tabela 3-4: Principais parâmetros especificados nas recs. G.957 [1], G.691 [3] e G.692 [6] da ITU-T relativamente ao receptor.</i>	34
<i>Tabela 3-5: Parâmetros usados na avaliação da aplicação V-16.x, usando fibras SMF e DSF.</i>	35
<i>Tabela 3-6: Organização das bandas de comprimentos de onda.</i>	41
<i>Tabela 5-1: Tabela resumo dos valores médios das perdas de inserção medidos em 1996 numa secção da rede óptica em operação (fibras norma G.653 [2] da ITU-T).</i>	79
<i>Tabela 5-2: Tabela resumo das perdas bidireccionais em juntas ópticas (valores em dB).</i>	81
<i>Tabela 5-3: Tabela resumo dos valores de reflectâncias discretas.</i>	83
<i>Tabela 5-4: Comparação dos valores medidos anteriormente há cerca de 10 anos e os actuais.</i>	85
<i>Tabela 5-5: Máximas distâncias (teóricas) alcançáveis na implementação dos níveis hierárquicos STM-N, em função da PMD (sistemas não compensados).</i>	89
<i>Tabela 6-1: Factores que contribuem para a margem de implementação dos sistemas de comunicação ópticos.</i>	105
<i>Tabela 6-2: Características mais importantes dos amplificadores usados nas simulações.</i>	105
<i>Tabela 6-3: Dispersão acumulada no percurso óptico da Tabela 5-1, com comprimento ~107 km.</i>	106
<i>Tabela 6-4: Parâmetros mais importantes usados na simulação de um ritmo de transmissão a 2,5 Gb/s, para a aplicação L-16.3 em 1552,524 nm.</i>	107
<i>Tabela 6-5: Valores obtidos na simulação usando os parâmetros da Tabela 6-4.</i>	107
<i>Tabela 6-6: Valores obtidos na simulação usando os parâmetros da Tabela 6-4 para uma potência óptica transmitida de +13 dBm.</i>	108
<i>Tabela 6-7: Valores obtidos na simulação usando os parâmetros da Tabela 6-4.</i>	108
<i>Tabela 6-8: Parâmetros mais significativos das aplicações L-64.3 e V-64.3.</i>	109
<i>Tabela 6-9: Valores obtidos na simulação a um ritmo de transmissão de 10 Gb/s.</i>	109
<i>Tabela 6-10: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-64.3, usando uma potência de emissão de +16 dBm.</i>	110
<i>Tabela 6-11: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-64.3 usando amplificação em linha.</i>	110

<i>Tabela 6-12: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-64.3 usando pré-amplificação..</i>	110
<i>Tabela 6-13: Parâmetros mais importantes a serem usados nas simulações de um sistema a 40 Gb/s (aplicação V-256.3).</i>	112
<i>Tabela 6-14: Valores obtidos na simulação a um ritmo de transmissão de 40 Gb/s, usando os parâmetros da Tabela 6-13.</i>	113
<i>Tabela 6-15: Valores obtidos nas simulações para a aplicação V-256.3 na avaliação da maior distância possível de ser percorrida mantendo a potência do emissor e complementarmente para verificação da potência óptica necessária para percorrer ~107 km.</i>	113
<i>Tabela 6-16: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-256.3 usando amplificação em linha.</i>	113
<i>Tabela 6-17: Valores obtidos na simulação para a aplicação V-256.3 usando pré-amplificação.</i>	114
<i>Tabela 6-18: Valores da dispersão usados na simulação da transmissão de 4 canais com os parâmetros dos lasers da Tabela 5-7.</i>	116
<i>Tabela 6-19: Distâncias alcançadas nas simulações em função da dispersão na fibra e do ritmo de transmissão, relativamente ao canal 3 da Figura 5-12.</i>	117
<i>Tabela 6-20: Distância alcançada na transmissão WDM de 4 canais (relativamente ao canal 3 da Tabela 5-79), usando a mesma potência por canal (+10,98 dBm).</i>	118
<i>Tabela 6-21: Potências ópticas por canal (P_{ch}) conforme o critério $P_{max} = +17$ dBm.</i>	119
<i>Tabela 6-22: Caracterização da transmissão de um sistema WDM de 8 canais, usando os critérios $P_{max} = +17$ dBm e $\Delta_s = 100$ GHz.</i>	120
<i>Tabela 6-23: Caracterização da transmissão de um sistema WDM com 16 canais, usando os critérios $P_{max} = +17$ dBm e $\Delta_s = 100$ GHz.</i>	120
<i>Tabela 6-24: Valores típicos de MDF em algumas fibras monomodo medidos em 1550 nm.</i>	122
<i>Tabela 6-25: Tabela resumo da avaliação das soluções mono- multi canal testadas em sistemas não amplificados.</i>	125
<i>Tabela A-1: Especificações principais para cabos de fibras ópticas da norma G.653 (Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable) da ITU-T.</i>	133
<i>Tabela B-1: Resumo das principais metodologias para aferição da qualidade de uma rede óptica.</i>	134
<i>Tabela C-1: Resumo das principais metodologias para aferição da qualidade de uma rede óptica. Perdas admissíveis em fibra óptica e elementos discretos.</i>	136
<i>Tabela C-2: Resumo das principais metodologias para aferição da qualidade de uma rede óptica. Valores toleráveis de ORL, de Dispersão Cromática e de PMD.</i>	137